



EESTI MAAÜLIKOOL  
Metsandus- ja maaehitusinstituut

Mart Müür

**LIIMITUD ÕHUKESSEINALISTE KARPTALADE  
UURIMINE**

EXAMINATION OF GLUED THIN WEBBED BOX BEAMS

Magistritöö  
Maaehituse õppekava

Juhendajad: noormeteadur Martti-Jaan Miljan

**Tartu 2018**

Eesti Maaülikool		Magistritöö lühikokkuvõte	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014			
Autor: Mart Müür		Õppekava: maaehitus	
Pealkiri: Liimitud õhukeseseinaliste karptalade uurimine			
Lehekülgi: 84	Jooniseid: 21	Tabeleid: 2	Lisasid: 8
Osakond:	Maaehitus		
Uurimisvaldkond:	Ehituskonstruksioonid		
Juhendaja:	nooremteadur Martti-Jaan Miljan		
Kaitsmiskoht ja aasta:	Tartu, 2018		
<p>Komposiit-ristlõikega õhukeseseinalised kergtalade turg on puitelamute ehitusel valdavalt kasvutrendis, sest need tarindielemendid kaaluvad vähem ja on stabiilsemate mõõtmetega kui tavaline saematerjal. Need eelised parendavad oluliselt ehituskvaliteeti. Talasid kasutatakse nii vahelagedes, välisseintes kui ka katusekonstruktsioonides.</p> <p>Antud lõputöö eesmärk on uurida liimitud karptalade paindekandevõimet, erinevaid deformatsioone, taastumist ja käitumist pikaajalise koormuse all. Otsida materjali sarnaste talade kohta varasemalt teostatud katsetustest ja uurimustest nii eestis kui ka välismaal.</p> <p>Töö käigus koostatakse antud talade kohta arvutusmetoodika, sooritatakse teoreetilised arvutused antud talade kohta ja võrreldakse neid katsetulemustega. Samuti analüüsitakse saadud resultaate varasemalt tehtud teadustöödega. Varasemate teadustööde ja Eesti Vabariigi standardite põhjal koostatakse katsemetoodika ja teostatakse katsetused.</p> <p>Talade paindekandevõime katsetuste tulemuseks on väiksemad läbipainded kui teoreetilistel arvutustel saadud tulemused. Toe lähedal tehtud ava karptala seina sisse ei vähenda märgatavalt tala paindetugevust.</p> <p>Pikaajalise katsetuse deformatsioonid olid roome mõjul suuremad kui arvutuslikud läbipainded.</p> <p>Antud diplomitöö tulemusi ja graafikuid saab kasutada edasiste täiendavate uuringute teostamisel. Tasub katsetada erineva ristlõikega talasid, uurida kontrollitud õhuniiskuse juures talade kandevõimet. Karptalade roome hindamiseks peaks teostama veel samalaadseid pikaajalise koormuse katseid.</p>			
Märksõnad: karptala, läbipaine, pikaajaline katse, liimliide, roome			

Estonian University of Life Sciences		Abstract of Master's Thesis	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014			
Author: Mart Müür		Speciality: Rural engineering	
Title: Examination of glued thin webbed box beams			
Pages: 84	Figures: 21	Tables: 2	Appendixes: 8
Department:	Rural building		
Field of research:	Construction		
Supervisor:	Junior researcher Martti-Jaan Miljan		
Place and date:	Tartu, 2018		
<p>The market for composite cross-section thin-webbed box-beams in building wooden structures is increasing as these structure elements weigh less and have more stable measurements than ordinary timber. These advantages improve the quality of construction significantly. The beams are used in ceilings, exterior walls and roof constructions.</p> <p>The purpose of this thesis is to examine the deflection load capacity of the glued box-beams, different deformations, recovery and behaviour when under a long term load. Also, to find references for similar beams from previous experiments and studies in Estonia and abroad.</p> <p>During this research the calculation methodology will be formed, theoretical calculations for the beams will be made and these will be compared with the test results. The results will also be analyzed with the previous scientific research. Taking into account the precious scientific research and Estonian standards a test method will be put together and tests will be made.</p> <p>The test results for the deflection load capacity of the beams shows smaller deflections than the theoretical calculations show. The aperture in the box-beam wall near the support does not decrease the deflection of the beam significantly.</p> <p>Long-term test deformations were bigger due to the creep than the deflections showed in the calculations.</p> <p>The results and graphs from this thesis can be used for conducting further supplementary studies. It is worth testing different cross-section beams, examining the load capacity of the beams with controlled humidity. To assess the creep of the box-beams similar long-term load tests should be conducted.</p>			
Keywords: box-beams, glued connection, long-term, deflection, creep			

## Sisukord

Sissejuhatus .....	6
1. VARASEMAD UURINGUD .....	8
1.1. Lühidalt kergtaladest.....	8
1.2. Kergtaladel lühiajalised paindekandevõime määramise uurimised.....	10
1.3. Kergtalade pikaajalised paindekandevõime uurimised.....	11
2. PAINDEKANDEVÕIME MÄÄRAMISE METOODIKA.....	14
2.1. Talade paindekandevõime määramise meetoodika .....	14
2.2. Paindekandevõime arvutusmetoodika .....	20
2.3. Pikaajalise paindekatse meetoodika .....	22
3. LIIMLIITEGA KARPTALADE ARVUTUSMETOODIKA .....	26
3.1. Liimliitega karptalad .....	26
3.2. Liimliitega karptala tugevusanalüüs kandepiirseisundis .....	26
3.3. Liimliitega karptalade vöödes esinevad pinged.....	29
3.4. Painde-, nihke- ja nõtkepinged tala seinas.....	32
3.5. Läbivajumid kasutuspiirseisundis.....	35
4. KATSETULEMUSTE JA TEOREETILISTE ARVUTUSTE ANALÜÜS .....	39
4.1. Paindekatsete tulemused ja analüüs .....	39
Kokkuvõte .....	43
Kasutatud kirjandus .....	45
Lisad .....	47
LISA 1. Katsetuste kokkuvõtte.....	48
LISA 2. Paindekatse talade koormamine ja deformatsioonid ajaskaalal.....	49
LISA 3. Liimitud karptalade deformatsioonid tsüklilisel koormamisel.....	54
LISA 4. Liimitud karptalade deformatsioonid vastavalt koormusele.....	55
LISA 5 Liimitud karptalade katse- ja purunemisskeemid .....	57
LISA 6. Liimitud karptalade purunemispildid .....	72



LISA 7 Liimliitega karptalade elastsusmoodul ajas tala koormamisel kuni tala kandevoime kaotuseni .....	80
LISA 8. Pikaajalise katse deformatsioon ajas .....	82

## Sissejuhatus

Inimkonna pideva kasvu ja linnastumise tõttu on vajalik juurde ehitada elamispindasid. Kuna maa kui ressurss on piiratud, on kerkivad hooned üha kõrgemad. Ehitussekroti põhi märksõnadeks võib pidada kiirust, kvaliteeti ja maksumust, samas pööratakse ka üha rohkem tähelepanu ökoloogilisusele. Puit on ehituse põhimaterjaliks olnud inimkonna algusaegadest. Tänapäeva ehitustavad ja karmistuvad ehitusnõuded on viinud täispuidust konstruktsioonide asendamiseni puitkomposiitmaterjalidega. Õhukeseseinalised kergtalad on kergemad, stabiilsemate omadustega ning jätavad väiksema ökoloogilise jalajälje kui täispuidust talad. Kuna tegemist on tehase toodanguga, saab igale objektile valmistada täpselt õige mõõduga ja kandevõimega talad.

Antud lõputöö eesmärk on uurida liimitud karptalade paindekandevõimet, erinevaid deformatsioone, taastumist ja käitumist pikaajalise koormuse all. Otsida materjali sarnaste talade kohta varasemalt teostatud katsetustest ja uurimustest nii eestis kui ka välismaal. Töö käigus sooritatakse teoreetilised arvutused antud talade kohta ja võrreldakse neid katsetulemustega. Samuti analüüsitakse saadud resultaate varasemalt tehtud teadustöödega. Karptalad on valmistatud AS Kodumaja tehases, kes on ehitanud hetkel maailma kõrgeima puitkarkasselamu – 14 korruselise, 52,8m kõrguse. Katsetused on sooritatud kolmes etapis, osaliselt on katsed on sooritatud endistes EMÜ maaehituse osakonna konstruktsioonide katselaboris, teisena endises EMÜ hoones Kreutzwaldi tn 64 ja lõpetuseks praeguses EMÜ maaehituse osakonna konstruktsioonide katselaboris.

Lõputöö esimeses peatükis tutvustatakse lühidalt õhukeseseinalisi kergtalasid. Välja on toodud enamlevinud ristlõiked ja enim kasutatavad materjalid. Alampeatükkides on kokkuvõtvalt kirjutatud juba teostatud uuringutest nii väliskirjandusest kui ka varasemast Eesti Maaülikooli 2010.a. lõputööst. Lisatud on erinevates uurimustöodes kasutatud katseskeeme ja erinevaid meetodikaid.

Teise peatüki moodustab karptalade katsemetoodikate tutvustamine. Peatükis on kirjeldatud katsekehasid, detailselt on lahti kirjutatud katseseadme püstitamistest. Lisatud on katseskeemid, kus näidatud andurite ja koormuspunktide kaugused tugedest, koormusgraafikud koormustsüklitega, pildid katseseadmest. Peatüki esimeses pooles on näidatud lühiajalise paindekandevõime määramise katsetuse protseduur ja teises pooles on

kisjeldatud pikaajalise paindekatse seadeldist ja koostamiseks vajalike parameetrite tuletamist.

Kolmandas peatükis on üksikasjalikult lahti seletatud karptalade teoreetiline arvutusmetoodika. Ära on näidatud tala erinevate osade ülesanded ja koormuse jaotumine talade osades. Kirjeldatud iga elemendi arvutamis ja kujutamist terviksüsteemis, arvestades kõikvõimalike osavaruteguritega.

Neljandas peatükis võrreldakse katsetulemusi teoreetiliste arvutuste tulemustega. Analüüsitakse saadud katsetulemusi, esitatakse graafikud saadud tulemuste varieeruvuse kohta. Tuuakse välja seoseid ja võrdlusmomente varasemalt teostatud uuringutega.

# 1. VARASEMAD UURINGUD

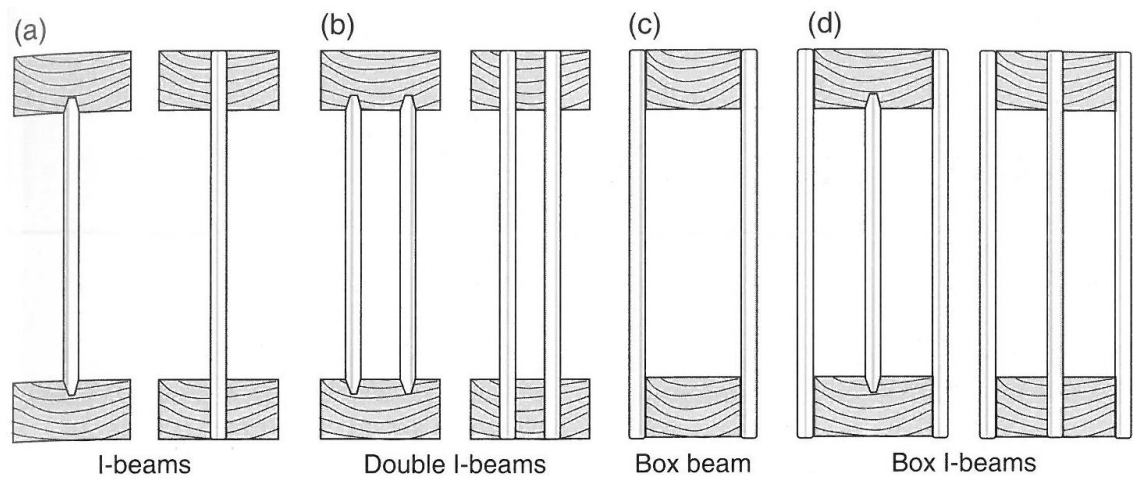
## 1.1. Lühidalt kergtaladest

Komposiit-ristlõikega õhukeseseinalised kergtalad võivad ristlõikekujult olla I - või ristküliku kujuga. Mõlemate konstruktsioon kujutab endast ühe või mitme seina ühendamist ülemise ja alumise vööga. Tala sisemuse võib täita soojustusmaterjaliga või tala tugevust ja vastupidavust suurendavate lahendustega. [1]

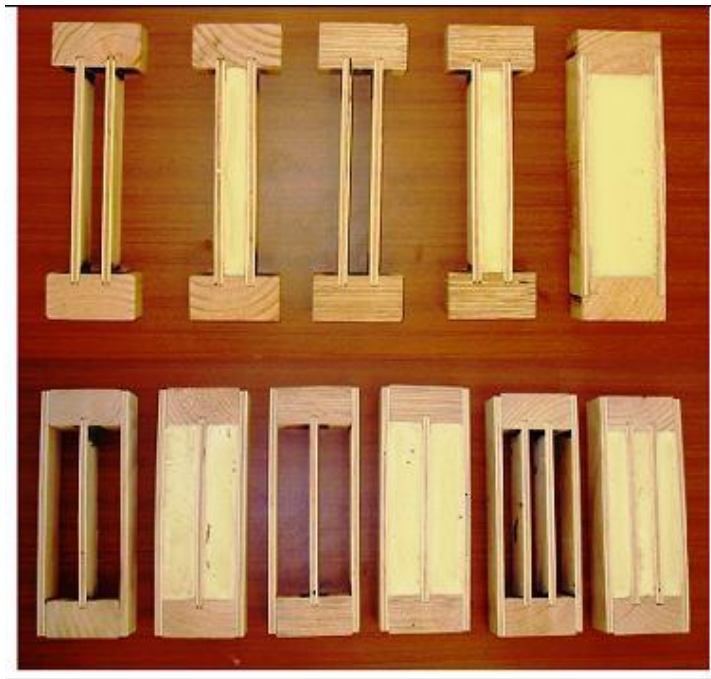
Vöödeks kasutatakse enamasti tugevsorteeritud okaspuidust materjali, kertopuud või sõrmjätkatud liimpuidust materjali. Talade seina materjalideks kasutatakse kõikvõimalikke konstruktsiooniplaate –OSB/3 plaadid, vineer- või konstruktsiooni puitlaastplaadid. Tala vööd ja seinad ühendatakse omavahel liimiga, naeltega, kruvidega, klambritega või mitut ühendusviisi korraga.

Komposiit-ristlõikega õhukeseseinalised kergtalade turg on puitelamute ehitusel valdavalt kasvutrendis, sest need tarindielemendid kaaluvad vähem ja on stabiilsemate mõõtmetega kui tavaline saematerjal. Need eelised parendavad oluliselt ehituskvaliteeti. Talasid kasutatakse nii vahelagedes, välisseintes kui ka katusekonstruktsioonides. Talad reeglina valmistatakse tehases ja seetõttu on tänu teostus tehnoloogiale muutub kogu ehitusprotsessi jaoks olevate materjalide tarnimine kiiremaks. Selline teguviis säästab ka loodust ja annab märgatava puidusäästu tänu puidupõhiste materjalide kasutamisele. Talasid saab valmistada vajaliku eeltõusuga, et vältida lühi- ja pikaajalisi paindeid. Samuti saab hõlpsasti muuta tala kõrgust, et suurendada talade kandevõimet või isolatsioonikihi paksust. [2] [3]

Erinevad kergtalade ristlõiked (Joonis 1.1.) ning näiteid võimalike soojusisolatsiooniga täidetavatest ristlõigetest (Joonis 1.2.).



**Joonis 1.1.** Erinevad kergetalade ristlõiked – a) *I-beams* - I-tala b) *Double I-beams* – topelt I-tala c) *Box beam* – karptala d) *Box I-beams* – kolme seinaga karptala [4]



**Joonis 1.2.** Erinevad karptalade ristlõiked, mida võib täita isolatsiooniga [5]

## 1.2. Kergtaladel lühiajalised paindekandevõime määramise uurimised

Kazushige Matsumoto, Yoshinori Ohashi ja Takuro Hirai kasutasid oma katsetustes sõrmjätkatud puidust vöödega ja OSBst või vineerist konstruktsiooniplaatidest seintega I-talasid. Uurimuses hinnati talade vastupidavust painutamisele, nihkele ja osalisele koormamisele ning uuriti proovikehade seisundi halvenemist vee mõjutusel.

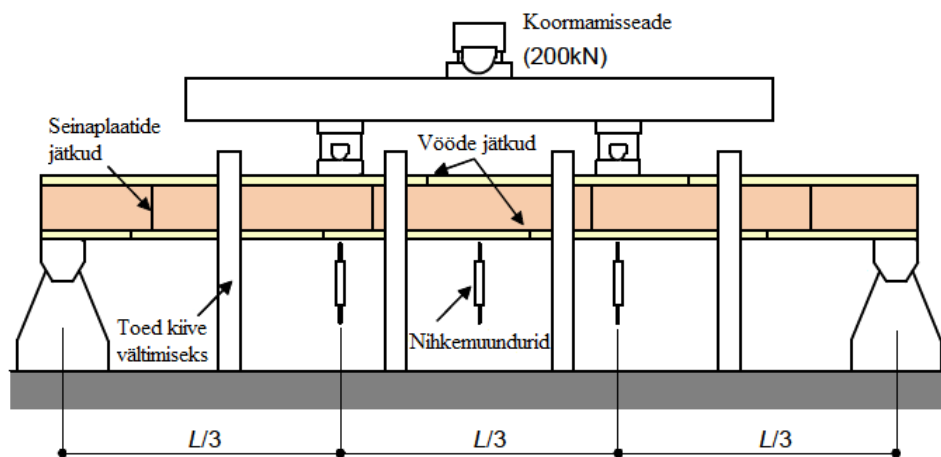
Katsetulemused näitasid, et I-talade maksimaalse paindesmomendi ja paindejäikuse statistiliselt iseloomulikud väärtused rahuldasiid praktilisi nõudeid ja nende elementidega saab asendada samades mõõtmetes saematerjalist talad. Samas ei ületanud nende vastupidavus nihkele, nihkejäikus ja vastupidavus osalisele koormamisele talade konstruktsioonide arvutamise väärtusi. Seinamaterjalide vaheline võrdlus näitas, et vineerist seinaga talade mehaanilised omadused ja pikaajaline sooritus olid kehvemad kui OSB-plaatidest seinaga taladel. Samas halvenes OSB-plaatidest talade seisund vettimisel rohkem kui vineerist taladel. Vöödena kasutatud 50x75mm sõrmjätkatud puidu puhul oli lapiti konstruktsiooni asetatud vöö tulemus alati parem serviti paigutatud töö tulemusest. [2]

Mäesepp ja Palm uurisid erinevate liidetega karptalade deformatsioone ja paindekandevõimet. Töö käigus koostati katseskeem ja valiti vastav meetodika karptalade paindekatsete teostamiseks. Arvutusteooria põhjal leiti sobiv arvutusmeetodika erinevatele liidetega karptaladele. [1]

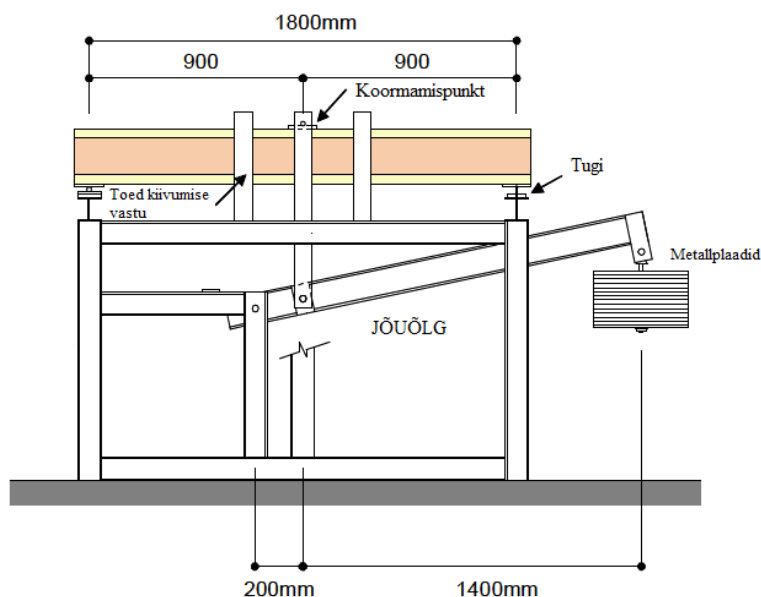
Töö tulemuseks tõdeti, et nael- ja kruviliitega karptalade läbipainded koormamise käigus on oluliselt suuremad deformatsioonid kui liimliitega talal ning see asjaolu on tingitud tala seina ja vöö omavahelisest nihkumisest. Seina ja vöö ühendamisel liimimise teel on tala oluliselt jäigem ja tugevam kui liide on ühendatud naelutamise või kruvimise teel. Talade elastusmoodulite võrdluses on kõige paremad näitajad liimliitega taladel. Seda kinnitab ka asjaolu, et liimliitega taladel on läbivajumid pärast üheksat koormamise tsüklit ja koormuse eemaldamist kõige väiksemad võrreldes algolukorraga. Nael- ja kruviliitega kergtalad ei saavuta peale koormuse eemaldamist samaväärset läbivajumi taastumist. Arvutusteooria põhjal koostatud talade kandevõime graafikutelt selgub, et kui kasutada 45x70 mm ristlõikega vöösid on otstarbekam need paigutada karptala konstruktsiooni lapiti. Antud uuring on võetud aluseks käesoleva lõputöö koostamisel. Kuna seda tüüpi katsekehasid oli nende uurimuses vaid 3, siis täpsemate andmete saamise tehti täiendavaid katsetusi. [1]

### 1.3. Kergtalade pikaajalised paindekandevõime uurimised

Kazushige Matsumoto, Yoshinori Ohashi ja Takuro Hirai uuringust võib näha, et katsetamethodikaid on erinevaid. Nende paindekatse illustratiivne skeem on toodud Joonisel 1.3, mis on sarnane käesolevas töös kasutatava skeemiga. Pikaajalise katse metoodiline skeem on toodud Joonis 1.4, mis erineb käesolevas töös kasutatud metoodikast täielikult. Pikaajaliseks koormamiseks on kasutatud jõuõlga ning tala on koormatud keskelt. Tulemusena on välja toodud, et vineerist elementide keskmine roometegur oli suurem kui OSB-plaatidest elementidel. See tulemus näitab, et seinamaterjal mõjutab roometegurit ja kõrge nihkele vastupidavusega plaat minimeerib pikas perspektiivis roome. [2]



Joonis 1.3. Paindekatse skeem [2]

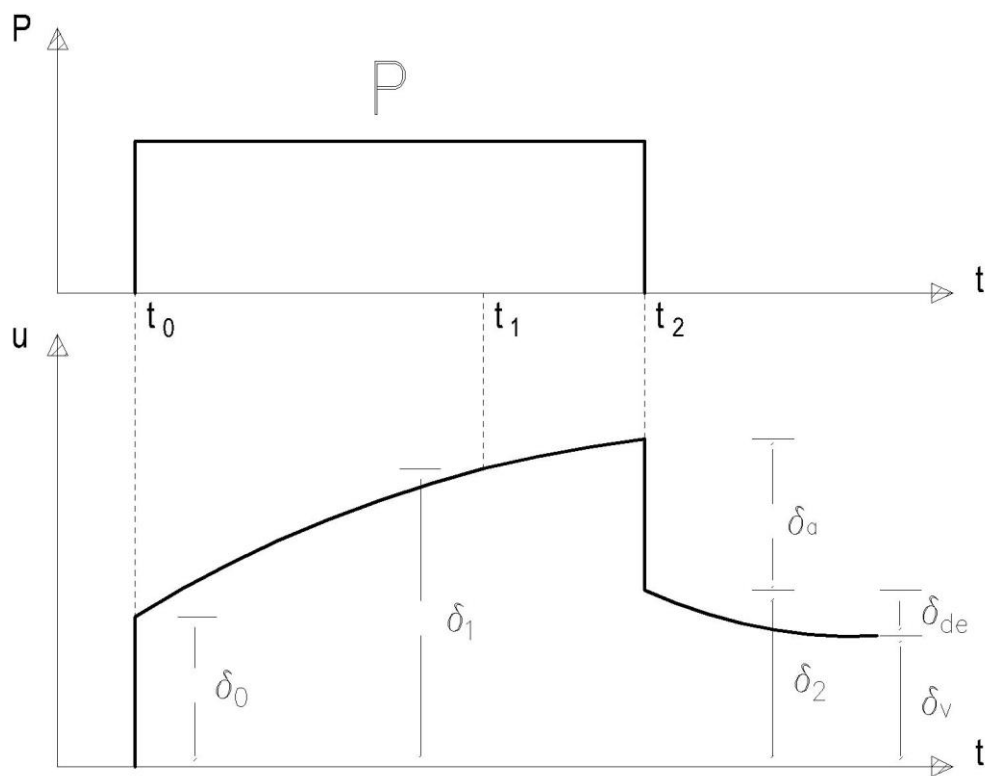


Joonis 1.4. Pikaajalise katse skeem [2]

Leichti, R. J.; Tang, R. C. artiklis, mis uurib saematerjali ja puit-komposiit I-talade roome mõju töökindlusele, on välja toodud, et töökindluse indeks on aja funktsioon. Nii saematerjal kui ja komposiitristlõikega puitvöödest I-talad kaotavad üle oma kahjustusläve koormamisel aja jooksul töökindlust. Komposiitsed I-talad on töökindlamad kui saematerjal ja neile ennustati pikemat töökindlat iga. [6]

Sarnase järelduseni jõudis oma artiklis ka Barbara Misztal – puidust vöödega komplekstala kombinatsiooni puitlaastplaadiga iseloomustab madalam roomekiirus kui puitlaastplaadil. Lisaks väheneb roomekiirus ajas ning juba konstruktsiooni koormamise esimesel etapil on see mitu korda madalam kui puitlaastplaadi enda roomekiirus. Leiti, et piiramatuga roomega materjalidest on võimalik koostada konstruktsioone, millel komplekselemendina on ajas kaduv roome. [3]

Nii Leichti ja Tang kui ka Misztal kasutasid oma artiklites Burgeri keha roomemudelit (Joonis 1.5.).



**Joonis 1.5.** Burgeri roomemudel. Märkus:  $P$  - püsiv koormus;  $u$  – läbipaine;  $t$  – aeg;  $\delta_0$ ,  $\delta_1$  &  $\delta_2$  – vastaval ajahetkel olev nihe;  $\delta_a$  - algne elastne nihe;  $\delta_{de}$  - viivitusega elastne nihe ja  $\delta_v$  - viskoosne voolavus [7]



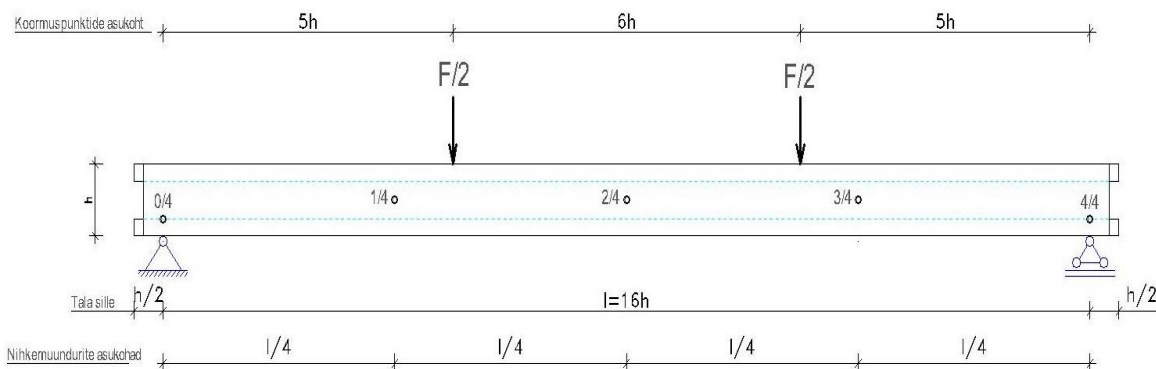
1978 Ameerika Ühendriikide põllumajandusosakonna uurimustöös võrreldi puitkiudplaatidest seintega I-talasid vineerist seintega I-taladega, kuna vineer on standardina aktsepteeritud materjal ehituskonstruksioonides. I-taladele rakendati koormus, mis tekitas tala seinas maksimaalse lubatud nihkepinge, neid katsetati kolmes keskkonnas – 1) kontrollitud tsüklilises temperatuuri ja õhuniiskuse keskkonnas 2) kontrollimatus sisekeskkonnas 3) kaitstud välikeskkonnas. Tulemustena on välja tootud: 1) tsüklilise õhuniiskusega keskkonda paigutatud talad purunesid poole aasta kuni aasta jooksul 2) sisekeskkonnas taladel väsimusemärke ei täheldatud, kuid läbipainded lähenesid lubatud maksimaalsele ( $\frac{l}{360}$ ) 3) välikeskkonnas taladel väsimusemärgid puudusid, kuid läbipainded ületasid lubatud taset. Kokkuvõtvalt on puitkiudplaadist seintega I-talade sooritus võrreldav vineerist seintega I-taladega, tsüklilise õhuniiskusega keskkonnas talade sooritusvõime väheneb oluliselt ning talade seinamaterjal imab keskkonnast täiendavalt niiskust sisse ja selle niiskussisaldus ei taastu samale tasemele. [8]

## 2. PAINDEKANDEVÕIME MÄÄRAMISE METOODIKA

### 2.1. Talade paindekandevõime määramise meetoodika

Karptalade paindekandevõime määramiseks kasutati EMÜ maaehituse osakonna endises konstruktsioonide katselaboris jõupõrandal asuvat jõuraami. Jõuraam võimaldab teostada ehituskonstruktsioonidega nii paindekatseid kui ka põikjõukatseid. Paindekatsete läbiviimisel tugineti standardis EVS-EN 408:2010+A1:2012 olevatel katsetamis- ja arvutusjuhistel.

Standardsete karptalade katseskeemi (vt Joonis 2.1.) koostamisel võeti aluseks karptala ristlõike kõrgus,  $h=300$  mm. Katsekeha silde pikkuseks oli 16 tala ristlõike kõrgust,  $l=4800$  mm. Katsekeha oli koormatud sümmeetriliselt kahes punktis, mille omavaheline vahekaugus võrdus kuuekordse ristlõike kõrgusega.

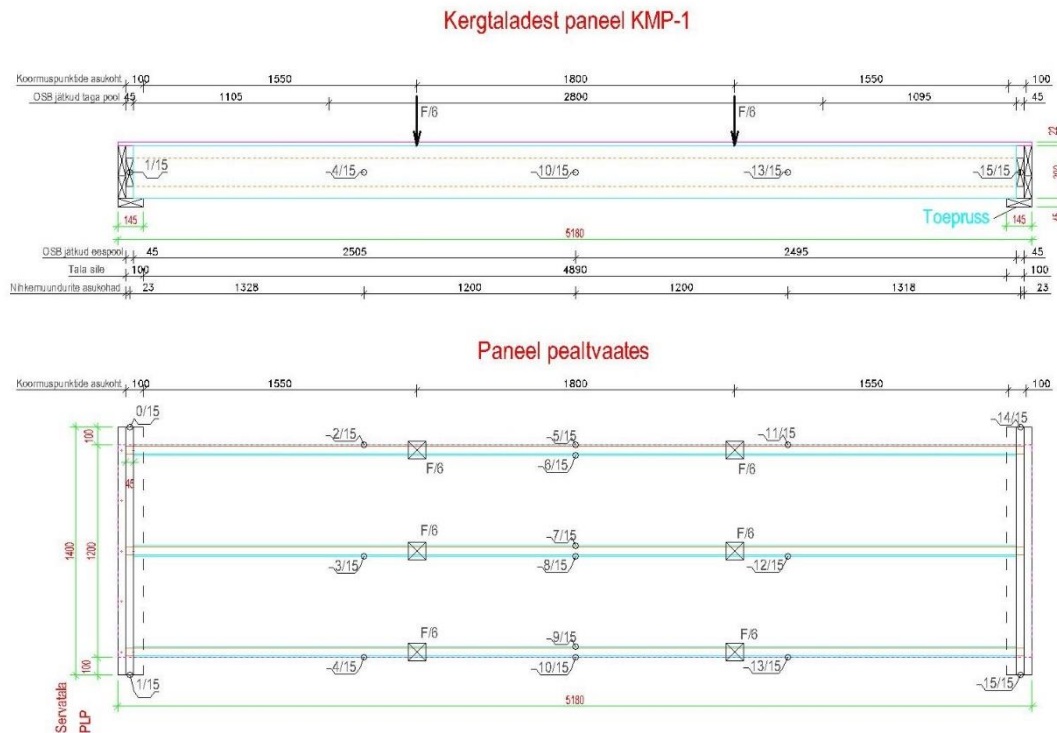


**Joonis 2.1.** Katseskeem paindeelastsusmooduli määramisel (autori skeem)

Standardkõrgusega karptalade katsekehasid katseseerias oli kolm tala (KM-4, KM-5 & KM-6). Teises katseseerias (kolm tala) katsetati sama koormamisskeemi põhimõttel karptalasid (KM-7, KM-8, KM-9), millel oli toepunktist 380mm kaugusele vööde vahele sisse freesitud 160mm diameetrine avaus. Kolmandas tehti katseseerias (kolm tala) katsetati

ka karptalaseid (KM-13, KM-14, KM15), mis olid kõrgusega  $h=400\text{mm}$  ja koormamisskeem jäi samaks mis on joonisel 2.1.

Katsetati ka valmis vahelaepaneeli KMP-1, mis koosnes kolmest  $300\text{mm}$  kõrgusest karptalast (KM-10, KM-11, KM-12), mis olid toetatud alusvööle ning seotud ka otsavöödega. Talade peale liimitud  $22\text{mm}$  paksune puitlaastplaat. Paneeli möödud on ära toodud joonisel 2.2.



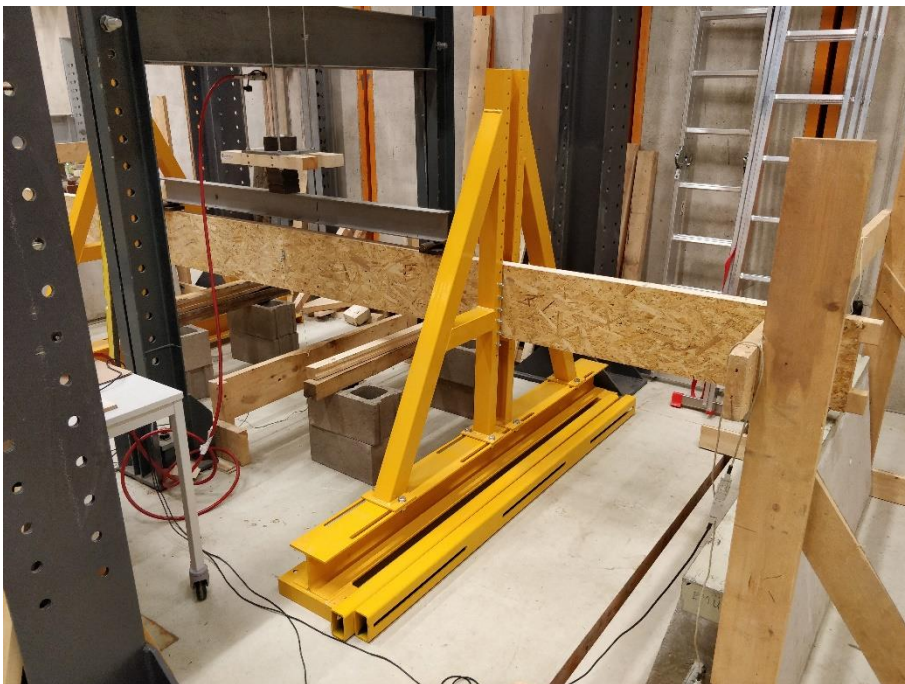
**Joonis 2.2.** Kergtaladest paneeli **KMP-1** katseskeem paindeelastsusmooduli määramisel (autori skeem)

Katsekeha oli asetatud vundamendi plokkidele ( $2390 \times 590 \times 400\text{ mm}$ ). Katsetala üks ots toetus liikumatule toele, mille moodustasid nurkraud ja muljumiste vähendamiseks terasplaat. Tala teine ots toetus liikuvale toele, mille moodustasid terasplaadid ja metallsilinder. Koormuse rakendamise punktidesse asetati samuti muljumiste vähendamiseks terasplaadid. Katsekeha külgedele välja kiivumise takistamiseks ehitati puitprussidest ( $50 \times 200\text{ mm}$ ) ajutine konstruktsioon. Jõuraam endises maaehituse osakonna konstruktsioonide katselaboris (vt Joonis 2.3.).



**Joonis 2.3.** Paindekatse seade endises Maaehituse osakonna konstruktsioonide katselaboris (autori foto)

Viimased kergtalad (KM-1, KM-2, KM-3), pikaajalise koormamise järgselt paindekandevõime määramise meetodikaga purustatud talad katsetati hiljem Eesti Maaülikooli maaehituse ja veemajanduse õppetooli uues konstruktsioonide katselaboris ( vt Joonis 2.4).



**Joonis 2.4.** Paindekatse seade Maaehituse osakonna konstruktsioonide katselaboris (autori foto)

Koormus katsekehadele (karptaladele) rakendati survesilindriga LUKAS LZM 25-200, mille poolt tekitatav maksimumkoormus on 250 kN. Rõhku silindris mõõdab digitaalne rõhuandur (Type FD821421U) baarides täpsusega 0,1 bar. Rõhuühiku (bar) teisendamise aluseks jõuühikuks (kN) oli LUKAS pressi kalibreerimistunnistus ATLF-10-/0053, mille põhjal võeti jõuühiku (kN) ja rõhuühiku omavaheliseks suhteks 0,4914. Survesilindri poolt rakendatav koormus jaotati kahte punkti terastalaga HEM-120.

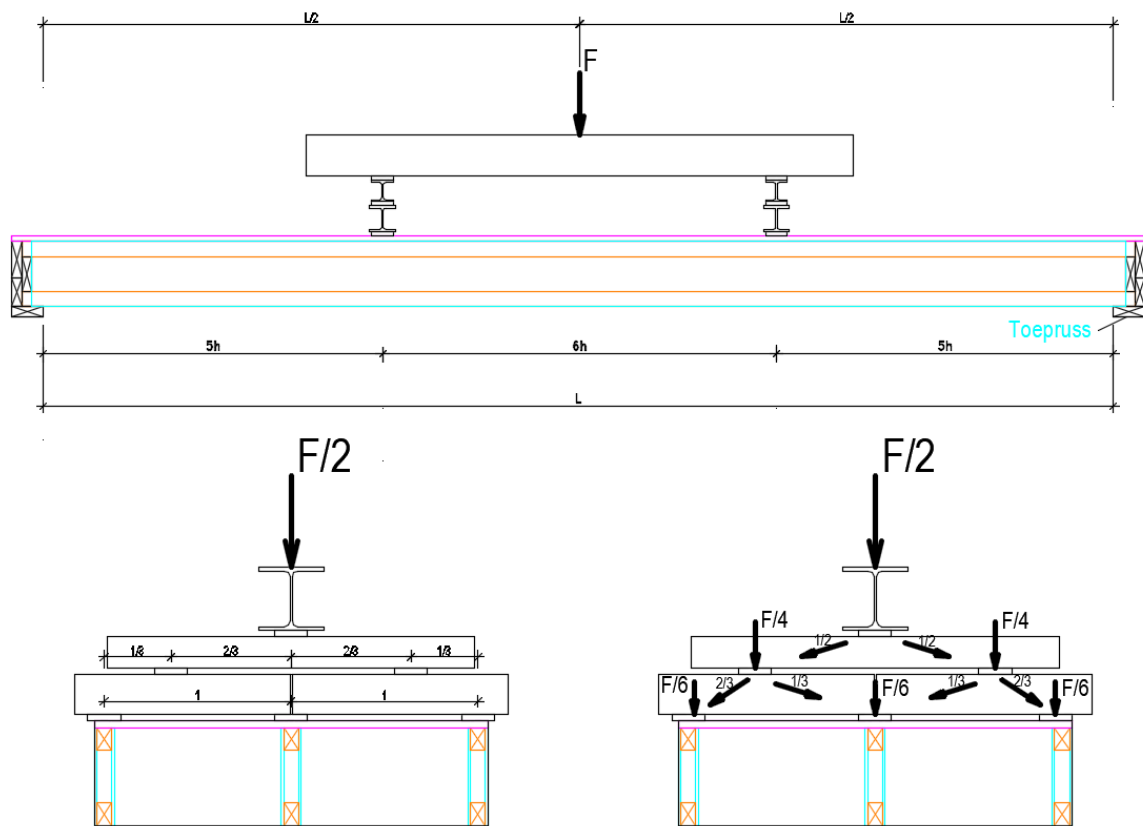
Tala läbipainde mõõtmiseks kasutati teineteisel pool tala seinale kinnitatud kuut Ahlborni nihkemuundurit 150 mm mõõtepiirkonnaga (Type FWA150T), mille mõõtetäpsus on 0,01mm (Product Catalogue 2011/2012). Läbipainet mõõtvad nihkemuundurid asusid positsioonidel, mis on tähistatud joonisel 2.1. numbritega 1; 2 ja 3.

Tugede võimalikku vajumist mõõdeti kahe 25 mm mõõtepiirkonnaga nihkemuunduriga (Type FWA025T), mille mõõtetäpsus on 0,001mm (Product Catalogue 2011/2012). Tugede vajumist mõõtvad nihkemuundurid tala esiküljel on tähistatud joonisel 2.1 numbritega 0 ja 4. Paneeli koormus jaotati võrdselt igale talale vastavalt skeemile (vt Joonis 2.2 ja Joonis 2.5), paneelile rakenduvates koormuspunktides on muljumise vähendamiseks kasutatud metallplaate.

Tugede võimalikku vajumist mõõdeti nelja 25 mm mõõtepiirkonnaga nihkemuunduriga (Type FWA025T), mille mõõtetäpsus on 0,001mm (Product Catalogue 2011/2012). Tugede vajumist mõõtvad nihkemuundurid tala esiküljel on tähistatud joonisel 2.2 numbritega 0; 1; 14 ja 15.

Paneelis olevate kolme tala läbipainde mõõtmiseks kasutati teineteisel pool tala seinale kinnitatud kahteteistkümnet Ahlborni nihkemuundurit 150 mm mõõtepiirkonnaga (Type FWA150T), mille mõõtetäpsus on 0,01mm (Product Catalogue 2011/2012). Läbipainet mõõtvad nihkemuundurid asusid positsioonidel, mis on tähistatud joonisel 2.2. numbritega 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12 ja 13.

Koormuse ühtlaseks jaotumiseks kasutati I-talasid ja metallplaate (Joonis 2.3.). Survesilindri rakendatud koormuse jagab esmalt kaheks terastala IPE-20, seejärel jaotavad 2 terastala HEB-120 koormuse alumisele kahele HEA-140 terastalale. Metallplaadid kahe alumises kihid oleva talavahel on asetatud kergtalade koormuspunktide vahele suhtega 1/3 ja 2/3. Paneeli koormamise skeem on joonisel 2.7, kus silindrile rakendatud kolme kordse väärtusena, kuna koormati kolme karptala. Paneelis olevale ühele karptalale pidi koormamine toimuma nagu on ära toodud joonisel 2.7, kus koormati ühte tala.



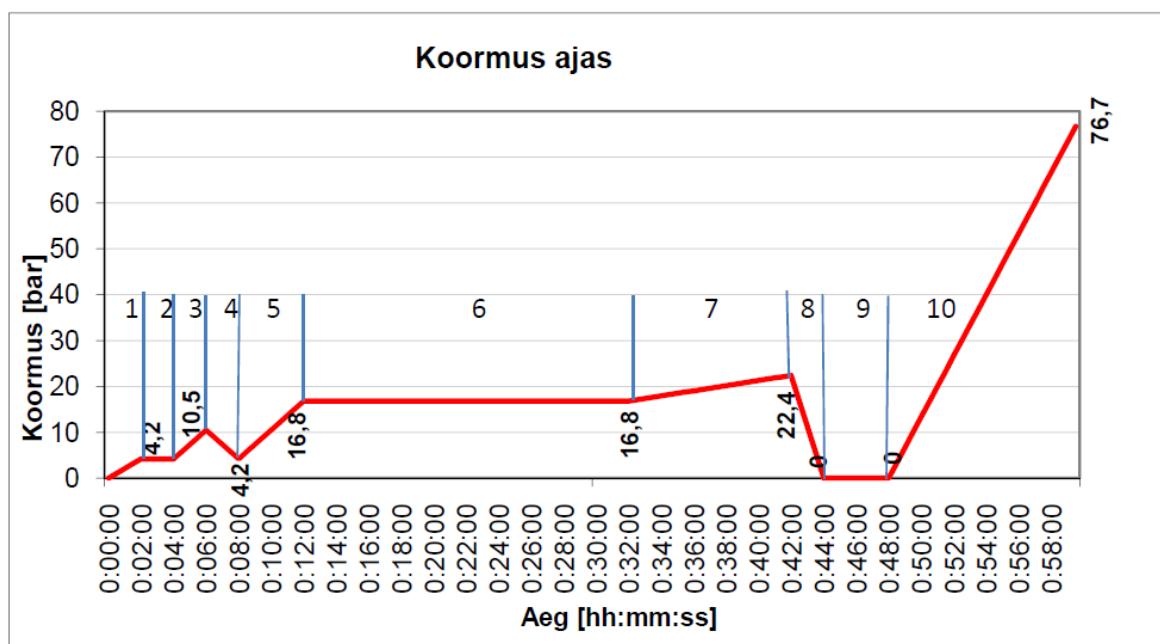
**Joonis 2.5.** Kergtaladest paneelile koormuse rakendamise skeem (autori skeem)



**Joonis 2.6.** Kergpaneeli paindekatse endises Maaehituse osakonna konstruktsioonise katselaboris (autori foto)



Koormuse rakendamise plaan koostati vastavalt standardile EVS-EN-380:1999. Koormust rakendati tsükliliselt, et saada võimalikult palju informatsiooni tala läbipainde käitumisest erinevate koormuskombinatsioonide korral. Kokku koosnes üks katse kümnest koormamise tsüklist (vt joonis 2.7). Esimese tsükli kestvus oli kaks minutit ning selle lõpuks oli tala koormatud alalise koormusega võrdse jõuga. Teise tsükli vältel hoiti seda koormust muutumatuna kaks minutit. Kolmanda tsükli lõpuks lisati alalisele koormusele veel lisaks pool muutuvkoormusest. Järgmise tsükliga eemaldati eelnevalt lisatud muutuvkoormus, et jälgida tala läbipainde taastumist. Viienda tsükli käigus lisati alalisele koormusele juurde kogu muutuvkoormus ning kuuenda tsükлина hoiti seda koormust talal 20 minutit, et jälgida tala käitumist pikemaajalise koormuse korral. Järgmise tsükli käigus suurendati 10 minuti jooksul koormust eeldatava maksimumkoormuseni. Kaheksanda tsükлина eemaldati talalt kogu eelnevalt rakendatud koormus. Järgmise tsükli käigus hoiti tala koormamatuks nelja minuti jooksul ning jälgiti tala läbipainde taastumist ja võrreldi seda algolukorraga (vt lisa 5). Viimase tsükli käigus koormati tala kuni kandevõime kaotuseni. [1]



**Joonis 2.7** Koormuse tõstmine ja langetamine ajas tsüklitena paindekatsel [1]

Paneeli KMP-1 korral oli koormus silindrile rakendatud kolme kordse väärtusena, kuna koormati kolme karptala. Paneelis olevale ühele karptalale pidi koormamine toimuma nagu on ära toodud joonisel 2.7, kus koormati ühte tala.

## 2.2. Paindekandevõime arvutusmetoodika

Paindekatsete andmete töötlemisel oli eesmärgiks talade elastsusmoodulite leidmine ning reaalseste läbipainete võrdlemine arvutuslike deformatsioonidega. Elastsusmooduli arvutusvalem tuletati kahe punktkoormusega koormatud tala läbipainde valemist, mis on välja toodud tabelis 3.1.

$$u = \frac{F \cdot a}{24 \cdot E_{0,mean} \cdot I_{ef}} \cdot (3 \cdot L^2 - 4 \cdot a^2) + \frac{F \cdot a}{A_w \cdot G_w} \Rightarrow G = 1080 \frac{N}{mm^2} \Rightarrow \quad (2.1)$$

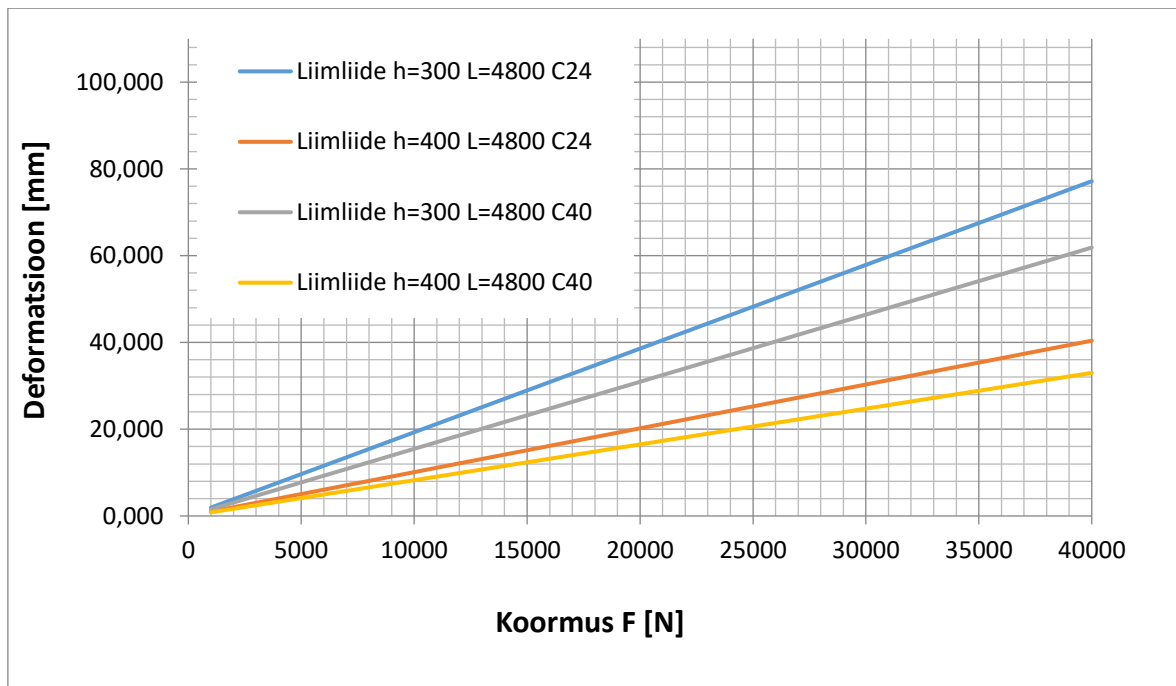
$$E_{0,mean} = \frac{F \cdot a \cdot (3 \cdot L^2 \cdot A_w - 4 \cdot a^2 \cdot A_w + 384 \cdot I_{ef})}{24 \cdot I_{ef} \cdot u \cdot A_w}, N/mm^2 \quad (2.2)$$

kus

- F - talale rakendatud jõud, N;
- a - jõu rakendamise kaugus toest, mm;
- L - tala sille, mm;
- $A_w$  - tala seina ristlõikepindala,  $mm^2$ ;
- $G_w$  - tala seina nihkemoodul,  $N/mm^2$ ;
- $E_{0,mean}$  - tala vöö materjali elastsusmoodul,  $N/mm^2$ ;
- u - tala läbipaine, mm;
- $I_{ef}$  - tala ristlõike inertsimoment,  $mm^4$ .

Joonisel 2.8. on esitatud karptalade seina kõrgusega 300mm ja 400mm ning C24 ja C40 saematerjalist vöödega arvutuslikud deformatsioonid sõltuvalt koormusest. Arvutuslik deformatsioon on saadud valemi 2.1. järgi. Saadud graafikuga võrreldakse katsegraafikuid.





**Joonis 2.8.** Arvutuslikud karptalade deformatsioonid olenevalt vöödeks kasutatava puitmaterjali tugevusklassist

## 2.3. Pikaajalise paindekatse metoodika

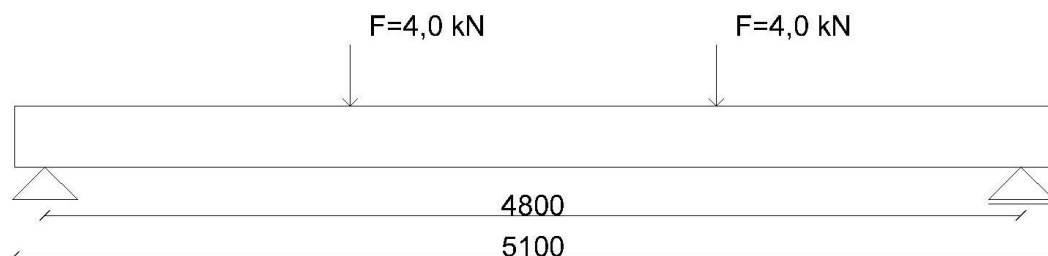
Karptalade pikaajalise paindekatse läbiviimine teostati endistes Eesti Maaülikooli keldrikorruse ruumides aadressiga Kreutzwaldi 64. Katse läbiviimisel toetuti standardile EVS-EN 408:2010+A1: 2012.

Katseskeemi (joonis 2.9.) koostamisel võeti aluseks karptala ristlõike standardkõrgus,  $h=300\text{mm}$ . Katsekeha sildepikkuseks oli 16 ristlõike kõrgust,  $l=4800\text{ mm}$ . Katsekeha oli koormatud sümmeetriliselt kahes punktis, mille omavaheline vahekaugus võrdus kuuekordse ristlõike kõrgusega. Katses osales kolm karptala (KM-1, KM-2, KM3).

Katsekeha oli asetatud betoonist õõnesplokkidele. Katsetala üks ots toetus liikumatule toele, mille moodustasid nurkraud ja muljumiste vähendamiseks terasplaat. Tala teine ots toetus liikuvale toele, mille moodustasid terasplaadid ja metallsilinder. Katseseade on kujutatud joonisel 2.12.

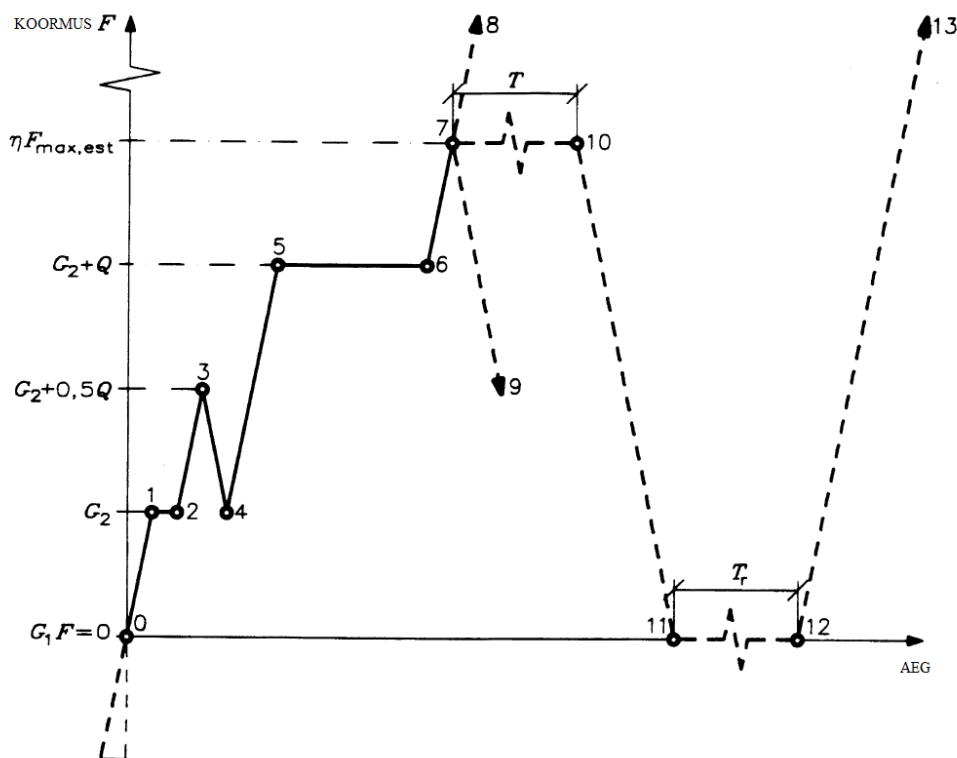
Tala läbipainde mõõtmiseks kasutati tala keskel teineteisel pool tala seinale kinnitatud kahte Ahlborni nihkemuundurit 150 mm mõõtepiirkonnaga (Type FWA150T), mille mõõtetäpsus on 0,01mm (Product Catalogue 2011/2012). Ülejäänud läbipainet mõõtvas asukohas kasutati ühel pool tala seinale kinnitatud kahte Ahlborni nihkemuundurit 150mm mõõtepiirkonnaga (Type FWA150T), mille mõõtetäpsus on 0,01mm (Product Catalogue 2011/2012). Läbipainet mõõtvad nihkemuundurid asusid positsioonidel, mis on tähistatud joonisel 2.1. numbritega 1, 2 ja 3.

Tugede võimalikku vajumist mõõdeti kahe 25 mm mõõtepiirkonnaga nihkemuunduriga (Type FWA025T), mille mõõtetäpsus on 0,001mm (Product Catalogue 2011/2012). Tugede vajumist mõõtvad nihkemuundurid tala esiküljel on tähistatud joonisel 2.1 numbritega 0 ja 4. Muundurite paigaldamiseks ehitati puitmaterjalist eraldiseised raam ümber katsekehade.



**Joonis 2.9.** Pikaajalise paindekatse skeem (autori skeem)

Koormuse rakendamise plaan koostati vastavalt standardile EVS-EN-380:1999 (joonis 2.10). Kui paindekandevõime määramisel koormusgraafik läks mööda punktiirjoont 9 punktis 11, 12 ja 13 kuni katsekeha purunemiseni, siis pikaajalise katseteetoodika puhul kulgeb graafik punktist 7 punkti 10 ja sealt edasi punktidesse 11, 12 ja 13. Antud uuringus punktide 7 ja 10 vaheline perioon oli 20.01.2012 kuni 27.02.2013 ning punktide 11 ja 12 vaheline periood oli 27.02.2013 kuni 18.05.2018.



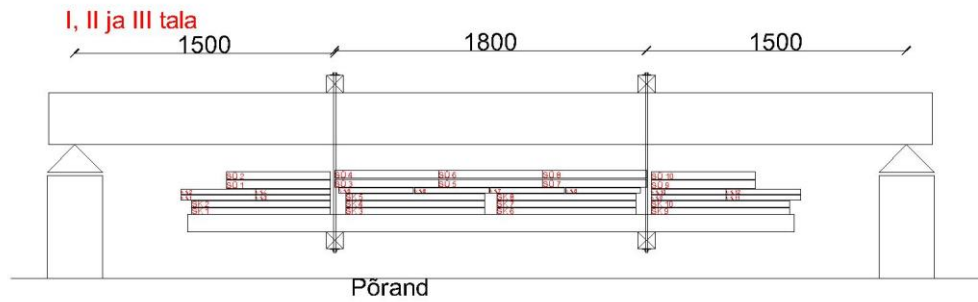
**Joonis 2.10.** Koormuse rakendamise skeem [9]

Katsekehadele rakendati kogu mõõteperioodi ajal koormus 8 kN. Perioodi lõpus eemaldati koormus taladelt ning jälgiti talade läbipainde taastumist.

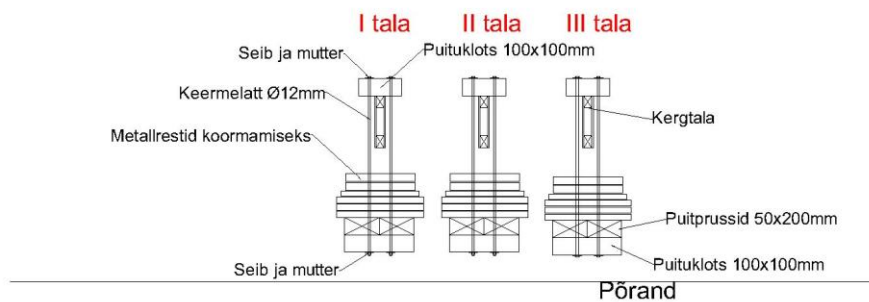
Talade koormamise katseline skeem on kujutatud joonisel 2.11. Koormuse rakendamise punktidesse asetati puitprussid, mille külge koormus keermelattidega riputati. Raskusteks kasutati malmist reste, mis laoti ühtlaselt puitprussidele 50x200mm. Restid kaaluti üksikhaaval +/-0,05 kg täpsusega ja asetati tabelitesse, et paigutada koormus ühtlaselt. Restide paigutus näidatud tabel 2.1.

Nihkemuundurite kinnitamiseks ehitati puitmaterjalist eraldiseisev raamistik ümber katseseadeldise. Tulemused salvestati intervalliga 15 minuti.

## KÜLGVAADE



## RISTLÕIGE



**Joonis 2.11.** Pikaajalise karptalade paindekatsede koormamise skeem (autori skeem)



**Joonis 2.12.** Pikaajaline katseseadeldis Friedrich Reinhold Kreutzwaldi 64 hoone keldrikorrusel (autori foto)

**Tabel 2.1.** Karptala koormamiseks kasutatud metallrestide ühtlase koormamise ja paigutuse tabel (autori tabel) Tabelis SÜ tähistab suurt üherealist resti, SK tähistab suurt kaherealist resti, VK tähistab väikest kaherealist resti. Tabelis toodud kaalud kilogrammides.

Kombinatsioon I		Raskuse kandja kaal		32,46 Metallrestide kaal kokku		786,7 Raskus kokku		819,16			
SÜ-2	33,53	SÜ-9		33,23	SÜ-1	30,23	SÜ-8		33,18	SÜ-4	33,25
SÜ-5	31,2	SÜ-6		32,35	SÜ-7	31,32	SÜ-10		32,78	SÜ-3	31,36
KOKKU	64,73	KOKKU		65,58	KOKKU	61,55	KOKKU		65,96	KOKKU	64,61
		SK-12			30,16	SK-2			30,18		
SK-3	28,19	SK-7			28,01	SK-15			28,03	SK-5	28,18
SK-1	27,89	SK-10			28,41	SK-11			28,38	SK-6	27,89
KOKKU	56,08	KOKKU			86,58	KOKKU			86,59	KOKKU	56,07
VK-2	14,9	VK-3	14,83	VK-1	15,28	VK-23	15,33	VK-6	14,8	VK-5	14,88
VK-4	14,76	VK-10	14,94	VK-12	14,78	VK-11	14,73	VK-7	14,96	VK-8	14,76
KOKKU	29,66	KOKKU	29,77	KOKKU	30,06	KOKKU	30,06	KOKKU	29,76	KOKKU	29,64
Kombinatsioon II		Raskuse kandja kaal		32,46 Metallrestide kaal kokku		786,59 Raskus kokku		819,05			
SÜ-12	33,01	SÜ-18		33,26	SÜ-16	29,92	SÜ-19		33,06	SÜ-15	32,99
SÜ-13	32,97	SÜ-22		32,82	SÜ-11	33,79	SÜ-23		32,99	SÜ-14	32,98
KOKKU	65,98	KOKKU		66,08	KOKKU	63,71	KOKKU		66,05	KOKKU	65,97
		SK-4			27,38	SK-21			27,66		
SK-13	28,13	SK-17			27,96	SK-16			27,82	SK-18	28,17
SK-14	28,55	SK-24			28,26	SK-19			28,07	SK-20	28,5
KOKKU	56,68	KOKKU			83,6	KOKKU			83,55	KOKKU	56,67
VK-9	14,89	VK-17	14,74	VK-13	15,07	VK-41	14,98	VK-19	14,71	VK-14	14,87
VK-16	14,83	VK-20	14,85	VK-18	14,8	VK-24	14,84	VK-22	14,86	VK-15	14,86
KOKKU	29,72	KOKKU	29,59	KOKKU	29,87	KOKKU	29,82	KOKKU	29,57	KOKKU	29,73
Kombinatsioon III		Raskuse kandja kaal		32,46 Metallrestide kaal kokku		786,45 Raskus kokku		818,91			
SÜ-26	31,55	SÜ-29		30,99	SÜ-21	32,71	SÜ-20		31,12	SÜ-31	31,56
SÜ-27	33,5	SÜ-17		32,21	SÜ-25	31,74	SÜ-30		32,06	SÜ-24	33,42
KOKKU	65,05	KOKKU		63,2	KOKKU	64,45	KOKKU		63,18	KOKKU	64,98
		SK-26			28	SK-32			27,98		
SK-8	28,85	SK-23			30,19	SK-28			30,35	SK-22	28,86
SK-29	28,28	SK-25			28,89	SK-30			28,69	SK-33	28,28
KOKKU	57,13	KOKKU			87,08	KOKKU			87,02	KOKKU	57,14
VK-27	14,92	VK-25	14,73	VK-39	14,87	VK-37	14,86	VK-36	14,73	VK-30	14,91
VK-26	14,77	VK-29	14,59	VK-33	14,75	VK-40	14,77	VK-31	14,55	VK-34	14,77
KOKKU	29,69	KOKKU	29,32	KOKKU	29,62	KOKKU	29,63	KOKKU	29,28	KOKKU	29,68

### **3. LIIMLIITEGA KARPTALADE ARVUTUSMETOODIKA**

#### **3.1. Liimliitega karptalad**

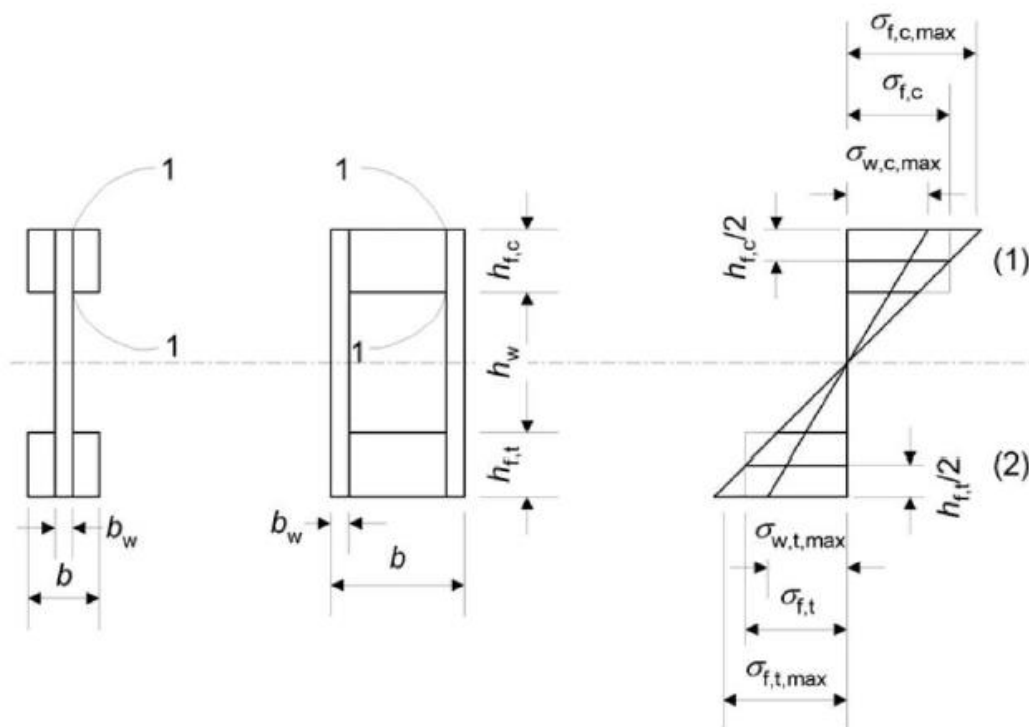
Kuna karptala osad on konstrueeritud töötama ühtselt, siis pinged võetakse vastu lineaarselt kogu karptala ristlõike ulatuses. Kuigi elastsusmooduli väärtus  $E$  on tavaliselt igal materjalil erinev, seetõttu ei saa paindeteooriat otseselt rakendada. Neid osasid tuleb analüüsida ja seetõttu kasutada ekvivalentsete lõigete meetodit.

Antud meetodis, valitakse üks peamine materjal komposiitsest osast ja teised asendatakse valitud selle materjali tulemustega samaväärsete pindaladega. Näiteks kui võtta kõne alla paine, siis jõud asendatud materjalidel ükskõik mis kaugusel neutraalsest teljest, on sama mis originaalmaterjalil samal kaugusel. Selle meetodiga luuakse ekvivalentne homogeenne osa, millele saab rakendada paindeteooriat. Valitud materjali paindepinge saadakse pingeanalüüsi kaudu. Asendatud materjali pinge saadakse korrutades homogeenses osas paindepinge tegeliku materjali elastsusmooduliga. [4]

Sama arvutusmetoodikat kasutasid oma lõputöös ka I. Mäesepp ja R. Palm.

#### **3.2. Liimliitega karptala tugevusanalüüs kandepiirseisundis**

Tugevusanalüüs viiakse läbi kandepiirseisundis (ULS) ja elastne pingejaotumine paindele allutatud tavalises ristlõikes on näidatud joonisel 3.1. Kus survetsoon on tähistatud (1) ja tõmbetsoon on tähistatud (2).



**Joonis 3.1.** Elastne pingajaotus õhukeseseinalistes talades [4]

Tingituna erinevate materjalide nihkest mingis konstruktsiooni osas, erinevad paindepinged selles osas vastavalt koormuse kestusele ja materjali niiskusesisaldusele. Seda mõju tuleb arvestada analüüsis. Pingajaotus määratakse kindlaks hetkelisest olukorrast ja tingimusest, mis tulenevad roomest. Eurokoodeksi 5 2.2.2(I)P nõue on, et analüüsi tehes tuleb kasutada lõplikke jäikuse keskväärtusi. Kooskõlas Eurokoodeksi 5, 2.2.2(I)P nõudega konstruktsiooni jäikuse näitajad eelpool nimetatud tingimustel on järgmised:

a) hetkelises olukorras

$$E_{d,ULS} = E_{mean} ; G_{d,ULS} = G_{mean} \quad (3.1)$$

b) jäikuse keskväärtus lõpuolukorras

$$E_{d,ULS} = \frac{E_{mean}}{(1 + \psi_2 \cdot k_{def})} \quad (3.2)$$

kus

$E_{d,ULS}$  - konstruktsiooni elastsusmoodul kandepiirseisundis;

$G_{d,ULS}$  - konstruktsiooni nihkemoodul kandepiirseisundis;

$E_{mean}$  - elemendi elastsusmooduli keskvärtus;

$G_{mean}$  - elemendi nihkemooduli keskvärtus;

$k_{def}$  - deformatsioonitegur puidul ja puidupõhistel materjalidel

$\psi_2$  - muutuva koormuse kombinatsiooniteguri tõenäoline esindussuurus, alalise koormuse puhul kasutatakse väärtust 1.

Tuginedes joonisel 3.1. kujutatud profiilidele eeldame vöö samaväärseid materjale valides, et:

a) samaväärset materjali on kasutatud igas vöös, materjalil on elastsusmooduli keskvärtus  $E_{mean,f}$  ja deformatsioonitegur  $k_{def,f}$ .

b) eeldame tala seina elastsusmooduli keskvärtust  $E_{mean,w}$  ja deformatsioonitegurit  $k_{def,w}$ .

Samaväärne ristlõikepindala  $A_{ef}$  ja inertsimoment  $I_{ef}$  avaldatakse järgnevalt

a) hetkelises olukorras:

$$A_{ef,inst} = A_f + \left( \frac{E_{mean,w}}{E_{mean,f}} \right) \cdot A_w \quad (3.4)$$

$$I_{ef,inst} = I_f + \left( \frac{E_{mean,w}}{E_{mean,f}} \right) \cdot I_w \quad (3.3)$$

b) jäikuse keskvärtus lõpuolukorras:

i) alalise koormuse korral

$$A_{ef,fin} = A_f + \left( \frac{E_{mean,w}}{E_{mean,f}} \right) \cdot \left( \frac{1 + k_{def,f}}{1 + k_{def,w}} \right) \cdot A_w \quad (3.6)$$

$$I_{ef,fin} = I_f + \left( \frac{E_{mean,w}}{E_{mean,f}} \right) \cdot \left( \frac{1 + k_{def,f}}{1 + k_{def,w}} \right) \cdot I_w \quad (3.5)$$

ii) alalise ja muutuva koormuse korral

$$A_{ef,fin} = A_f + \left( \frac{E_{mean,w}}{E_{mean,f}} \right) \cdot \left( \frac{1 + \psi_{2,i} \cdot k_{def,f}}{1 + \psi_{2,i} \cdot k_{def,w}} \right) \cdot A_w \quad (3.7)$$



$$I_{ef,fin} = I_f + \left( \frac{E_{mean,w}}{E_{mean,f}} \right) \cdot \left( \frac{1 + \psi_{2,i} \cdot k_{def,f}}{1 + \psi_{2,i} \cdot k_{def,w}} \right) \cdot I_w \quad (3.8)$$

kus

$A_f$  - vöö ristlõikepindala (vt valem 3.9)

$$A_f = (b - 2 \cdot 2_w) \cdot (h_{f,c} + h_{f,t}) \quad (3.9)$$

$A_w$  - seina ristlõike pindala (vt valem 3.10)

$$A_w = 2 \cdot b_w \cdot (h_w + h_{f,c} + h_{f,t}) \quad (3.10)$$

$\psi_2$  on muutuva koormuse kombinatsioonitegur

Kui konstruktsiooni paindemoment  $M_d$  ja tala seina elastsusmoodul on väiksem kui vöö elastsusmoodul, siis paindepinged vöös kasvavad ja seinas langevad samaaegselt. Sellises olukorras on vajalik jälgida pingeid vöös ainult lõpuolukorras ja seintes hetkelises olukorras. Kui aga seina elastsusmoodul on suurem kui vöö elastsusmoodul, siis paindepingeid vöös tuleb jälgida hetkelises olukorras ja seinas lõpuolukorras. Kui tegemist on sümmeetriliste osadega, siis erinevused pingetes on suhteliselt väikesed. [4]

### 3.3. Liimliitega karptalade vöödes esinevad pinged

#### a) Paindepinged

Maksimaalne pinge paindel tekib neutraalsest teljest kõige kaugemal olevas kiududes ( $y_1$  ja  $y_2$ ). Kui see konstruktsioon on sümmeetriline y-telje suhtes, siis  $y_1 = y_2$  ja kui ei ole, siis  $y_1$  ja  $y_2$  on erinevad. Lisaks kui konstruktsioon ei ole y-telje suhtes sümmeetriline, siis neutraalse telje asukoht on hetkelisest ja lõplikust olukorrast erinev, ja seega  $y_1$  ja  $y_2$  on sellises olukorras samuti erinevad. Seepärast märgitaksegi tekstis ära hetkelised y-väärtused ( $y_{1,inst}$  ja  $y_{2,inst}$ ) ja lõplikud y-väärtused ( $y_{1,fin}$  ja  $y_{2,fin}$ ). Konstruktsiooni maksimaalne paindest tingitud survepinge on  $y_1$  juures ja hetkelises olukorras on

$$\delta_{f,inst,c,max,d} = \delta_{c,1} = \left( \frac{M_d}{l_{ef,inst}} \cdot y_{1,inst} \right) \quad (3.11a)$$

ja keskväärtus lõplikus olukorras on

$$\delta_{f,fin,c,max,d} = \delta_{c,1} = \left( \frac{M_d}{l_{ef,fin}} \cdot y_{1,fin} \right) \quad (3.11b)$$

konstruktsiooni maksimaalne tõmbepinge on  $y_2$ -s ja hetkelises olukorras on

$$\delta_{f,inst,t,max,d} = \delta_{t,1} = \left( \frac{M_d}{l_{ef,inst}} \cdot y_{2,inst} \right) \quad (3.12a)$$

ja lõplikus keskväärtuse olukorras on

$$\delta_{f,fin,t,max,d} = \delta_{t,1} = \left( \frac{M_d}{l_{ef,fin}} \cdot y_{2,fin} \right) \quad (3.12b)$$

Konstruktsiooni nõue Eurokoodeks 5 lõikes 9 on, et konstruktsiooni pinged valemities (3.11) ja (3.12) on väiksemad või võrdsed konstruktsiooni paindetugevusega  $f_{md}$ .

$$\delta_{f,fin,t,max,d}, \delta_{f,inst,t,max,d} \text{ ja } \delta_{f,fin,t,max,d}, \delta_{f,fin,t,max,d} \leq f_{md} \quad (3.13)$$

#### b) Survepinged

Kuigi liimliitega õhukeseseinalise konstruktsiooni külgsuunalise ebastabiilse käitumise analüüsi saab teha, siis Eurokoodeks 5-s oletatakse, et konstruktsiooni külgsuunaline stabiilsus sõltub ainult surutud vöö nõtkejõust. Konstruktsiooni nõue on, et vöö survepinge peab olema väiksem või võrdne survetugevusega. Survepinge võetakse vöö survepinge keskmine väärtus, mis on tingitud paindest ja selle nõue hetkelises olukorras on

$$\delta_{f,inst,c,d} = \delta_{c,2} = \left( \frac{M_d}{l_{ef,inst}} \cdot \left( y_{1,inst} - \frac{h_{f,c}}{2} \right) \right) \quad (3.14a)$$

ja lõpuolukorras

$$\delta_{f,fin,c,d} = \delta_{c,2} = \left( \frac{M_d}{l_{ef,fin}} \cdot \left( y_{1,fin} - \frac{h_{f,c}}{2} \right) \right) \quad (3.14b)$$

Eurokoodeks 5-e konstruktsiooninõuded on, et konstruktsiooni pinge peab olema väiksem või võrdne modifitseeritud konstruktsiooni survetugevusega

$$\delta_{f,inst,c,d} \text{ ja } \delta_{f,fin,c,d} \leq k_c \cdot f_{c,0,d} \quad (3.15)$$

$$\text{ja } f_{c,0,d} = \frac{k_{mod} \cdot k_{sys} \cdot f_{c,0,k}}{\gamma_M} \quad (3.15)$$

kus

$f_{c,0,d}$  on tala vöö materjali arvutuslik survetugevus pikikiudu;

$f_{c,0,k}$  on tala vöö materjali normatiivne survetugevus pikikiudu;

$k_{mod}$  on koormuse kestuse ja niiskuse mõju arvestav modifikatsioonitegur;

$k_{sys}$  on süsteemi tugevuse tegur;

$\gamma_M$  on materjali omaduse osavarutegur.

c) Tõmbepinged

Samuti peab tõmbevöös kontrollima, et keskmine konstruktsiooni tõmbepinge ei ületaks konstruktsiooni tõmbetugevust. Hetkeolukorras on

$$\delta_{f,inst,t,d} = \delta_{t,2} = \left( \frac{M_d}{l_{ef,inst}} \cdot \left( y_{2,inst} - \frac{h_{f,t}}{2} \right) \right) \quad (3.16a)$$

ja lõpuolukorras

$$\delta_{f,fin,t,d} = \delta_{t,2} = \left( \frac{M_d}{l_{ef,fin}} \cdot \left( y_{2,fin} - \frac{h_{f,t}}{2} \right) \right) \quad (3.16b)$$

Eurokoodeks 5-e nõue on, et konstruktsiooni pinge peab olema väiksem või võrdne konstruktsiooni tõmbetugevusega

$$\delta_{f,inst,t,d} \text{ ja } \delta_{f,fin,t,d} \leq f_{t,0,d} \quad (3.17)$$

$$\text{ja } f_{t,0,d} = \frac{k_{mod} \cdot k_{sys} \cdot k_h \cdot f_{t,0,k}}{\gamma_M} \quad (3.18)$$

kus

$f_{t,0,d}$  on tala vöö materjali arvutuslik tõmbetugevus pikikiudu;

$f_{t,0,k}$  on tala vöö materjali normtõmbetugevus pikikiudu;

$k_h$  on ristlõike kõrguse tegur.

[4]

### 3.4. Painde-, nihke- ja nõtkepinged tala seinas

Tala seinapeamine funktsioon on aidata nihkepingete vastuvõtmisel, kuna see on allutatud ka paindest tingitud surve- ja tõmbepingetele, peab see ka nendele pingetele vastu pidama. Suletud talas on seinamaterjal seotud ühtseks osaks, kus aga ei ole see võimalik, on nõutud seinajätkamise plaadid, et kanda edasi pingeresultante liidete kohtades.

Edasi peab kontrollima, et sein ei nõtkuks tingitud nihkepingetest ja et liimliited seinaja vöö vahel oleksid võimalised edasi kandma horisontaalseid nihkepingeid talas. Kui talale tulevad vertikaalsed punktkoormused, peab arvatavasti kasutama seinatugevdajaid (ribisid), et vältida horisontaalset seinanõtkumist.

#### a) Paindepinged

Maksimaalsed paindest tingitud pinged seinas tekivad äärmistes asukohtades  $y_1$ -s ja  $y_2$ -s mõõdetuna neutraalsest teljest. Konstruktsiooni maksimaalne survepinge seinas tekib  $y_1$ -s ja hetkeolukorras on see

$$\delta_{w,inst,c,d} = \delta_{c,3} = \left( \frac{M_d}{l_{ef,inst}} \cdot y_{1,inst} \right) \cdot \left( \frac{E_{mean,w}}{E_{mean,f}} \right) \quad (3.19a)$$

ja lõpuolukorras

$$\delta_{w,fin,c,d} = \delta_{c,3} = \left( \frac{M_d}{l_{ef,fin}} \cdot y_{1,fin} \right) \cdot \left( \frac{E_{mean,w} \cdot (1 + \psi_2 \cdot k_{def,f})}{E_{mean,f} \cdot (1 + \psi_2 \cdot k_{def,w})} \right) \quad (3.19b)$$

Konstruktsiooni maksimaalne tõmbepinge seinas tekib  $y_2$ -s ja hetkeolukorras on see

$$\delta_{w,inst,t,d} = \delta_{t,3} = \left( \frac{M_d}{l_{ef,inst}} \cdot y_{2,inst} \right) \cdot \left( \frac{E_{mean,w}}{E_{mean,f}} \right) \quad (3.20a)$$

ja lõpuolukorras

$$\delta_{w,fin,t,d} = \delta_{t,3} = \left( \frac{M_d}{l_{ef,fin}} \cdot y_{2,fin} \right) \cdot \left( \frac{E_{mean,w} \cdot (1 + \psi_2 \cdot k_{def,f})}{E_{mean,f} \cdot (1 + \psi_2 \cdot k_{def,w})} \right) \quad (3.20b)$$

Kui tala sein on ümber modifitseeritud tala vöö materjaliks ekvivalentses osas, siis selleks, et säilitada üldse mingit pinget selles elemendis, peab väljaarvutatud pinge korrutama vastava deformatsiooni teguriga nagu näidatud valemite (3.19b) ja (3.20b).

Eurokoodeks 5 lõikes 9 on nõue, et konstruktsiooni survepinge seinas valemi 3.19 järgi peab olema väiksem või võrdne seina survetugevusega  $f_{c,w,d}$  ja konstruktsiooni seina tõmbepinge valemities 3.20a ja 3.20b peab olema väiksem või võrdne seina tõmbetugevusega  $f_{t,w,d}$

$$\delta_{w,inst,c,d} \text{ ja } \delta_{w,fin,c,d} \leq f_{c,w,d} \quad (3.21)$$

$$\delta_{w,inst,t,d} \text{ ja } \delta_{w,fin,t,d} \leq f_{t,w,d} \quad (3.22)$$

$$\text{kus } f_{c,w,d} = \frac{k_{mod} \cdot k_{sys} \cdot f_{c,w,k}}{\gamma_M} \quad (3.23)$$

$$\text{ja } f_{t,w,d} = \frac{k_{mod} \cdot k_{sys} \cdot f_{t,w,k}}{\gamma_M} \quad (3.24)$$

Siin nagu eelnevalt kirjeldatud on  $f_{c,w,k}$  ja  $f_{t,w,k}$  vastavalt seina materjali arvutusliku survetugevuse ja seina materjali arvutusliku tõmbetugevuse karakteristikud. Kui neid väärtusi ei ole antud lubab Eurokoodeks 5 9.1.1(5) materjali enda survetugevust ja tõmbetugevust kasutada.

b) Seina nõtkes (tingitud nihkest) ja nihkepinge kontroll Kogu nihkest tingitud nõtkesanalüüsi võib teha kontrollimaks tala seina nõtkes vastupanu; kuigi alternatiivina võib kasutada ka Eurokoodeks 5-s (9.1.1(7)) nõtkes vastupanu kriteeriumit. Eurokoodeks 5-e meetod on konservatiivne ja lihtne kasutada. See kriteerium on:

$$h_w \leq 70 \cdot b_w \quad (3.25)$$

Kuigi nihkepinge seinas muutub, kui  $h_w \leq 35 \cdot b_w$ , eeldades üldist nihkepinge jaotumist efektiivne seina kõrgus nihke vastupanu jaoks on  $(h_w + 0,5 \cdot (h_{f,t} + h_{f,c}))$ . Kuigi piirkonnas  $35 \cdot b_w < h_w \leq 70 \cdot b_w$  nihke vastupanu on vähendatud tingituna nõtkes ebapüsivast mõjust, ning eeldades üldise nihkepinge jaotumist I-tala või karptala puhul selles piirkonnas, tala seina kõrgus sõltub  $h_w$  väärtusest. Eurokoodeks 5-s konstruktsiooni nõuded on:

$$F_{v,w,Ed} \leq \begin{pmatrix} b_w \cdot h_w \cdot \left(1 + \frac{0,5 \cdot (h_{f,t} + h_{f,c})}{h_w}\right) \cdot f_{v,0,d}, kus \Rightarrow h_w \leq 35 \cdot b_w \\ 35 \cdot b_w^2 \cdot \left(1 + \frac{0,5 \cdot (h_{f,t} + h_{f,c})}{h_w}\right) \cdot f_{v,0,d}, kus \Rightarrow 35 \cdot b_w < h_w \leq 70 \cdot b_w \end{pmatrix} \quad (3.26)$$

$$f_{v,0,d} = \frac{k_{mod} \cdot k_{sys} \cdot f_{v,k}}{\gamma_M} \quad (3.27)$$

c) Horisontaalsed nihkepinged seina ja vöö vahelistes liimliidetes

Horisontaalsed nihkepinged, mis tekivad vööpiirkonnas, kantakse vöö ja seina vahel üle liimliitega. Nendes ühendustes olev liim suudab neid pingeid vastu võtta ja konstruktsiooni seisukorra puhul jääb rolli mängima tala seina nihketugevus. Konstruktsiooni nihkepinge hetkeolukorras on

$$\tau_{inst,mean,d} = \frac{V_d \cdot S_{f,inst}}{l_{ef,inst} \cdot (2 \cdot h_f)} \quad (3.28a)$$

ja keskväärtus lõpuolukorras

$$\tau_{fin,mean,d} = \frac{V_d \cdot S_{f,fin}}{l_{ef,fin} \cdot (2 \cdot h_f)} \quad (3.28b)$$

kus

$\tau_{inst,mean,d}$  ja  $\tau_{fin,mean,d}$  on arvutuslik nihkepinge vastavalt hetkelises ja lõplikus deformatsiooni olukorras tala vöö ja seina vahelises liites;

$V_d$  on arvutuslik põikjõud;

$S_{f,inst}$  ja  $S_{f,fin}$  on tala vöö ristlõike staatiline moment (välja arvatud tala sein) hetkelises ja lõplikus deformatsiooni olukorras;

$h_f$  on tala vöö kõrgus.

Eurokoodeks 5 võtab arvesse ka pinge kontsentratsioonide mõju seina ja tala liite ümbruskonnas, kui vöö kõrgus on suurem kui  $4 \cdot b_{ef}$  ja konstruktsiooni tugevusnõuded on:

$$\tau_{inst,mean,d} \text{ ja } \tau_{fin,mean,d} \leq \begin{pmatrix} f_{v,90,d} & , kus \Rightarrow h_f \leq 4 \cdot b_{ef} \\ f_{v,90,d} \cdot \left(\frac{4 \cdot b_{ef}}{h_f}\right)^{0,8} & , kus \Rightarrow h_f > 4 \cdot b_{ef} \end{pmatrix} \quad (3.29)$$

$$f_{v,90,d} = \frac{k_{mod} \cdot k_{sys} \cdot f_{r,k}}{\gamma_M} \quad (3.30)$$

Karptalade puhul  $b_{ef} = b_w$ .

[4]

### 3.5. Läbivajumid kasutuspiiriseisundis

Erinevad konstruktsiooni komponentide omadused, mis sõltuvad ajast, tuleb võtta arvesse. Hetkeolukorra deformatsiooni analüüs toimub kasutades konstruktsiooni koormuskombinatsiooni väärtust kasutuspiiriseisundis, kas võrrandit 3.24 või 3.25. Kui komponentide nihe pole asjakohane sellele olukorrale, siis vastavalt Eurokoodeksi 5, 2.2.3(2) nõudele, tuleb kasutada elastsusmooduli ja nihkemooduli keskväärtust  $E_{mean}$  ja  $G_{mean}$  saamaks teada jäikuse omadused. Lõpliku deformatsiooni analüüsis koormamine toimub samamoodi kui hetkeolukorra deformatsiooni analüüsis, nihke mõju suurus on saadud kasutades vähendatud jäikuse omadusi, esitatud järgnevates valemities:

$$E_{mean,fin} = \frac{E_{mean}}{(1 + k_{def})} \quad (3.31)$$

$$G_{mean,fin} = \frac{G_{mean}}{(1 + k_{def})} \quad (3.32)$$

kus

$E_{mean,fin}$  on lõplik elastsusmooduli keskväärtus

$E_{mean}$  on elastsusmooduli keskväärtus

$G_{mean,fin}$  on lõplik nihkemooduli keskväärtus

$G_{mean}$  on nihkemooduli keskväärtus

$k_{def}$  on deformatsioonitegur puidul.

Konstruktsiooni puhul, mis on paigaldatud kiudude küllastusastme või sellele lähedase niiskusega, mis tõenäoliselt kuivab koormuse all välja, siis tuleb Eurokoodeksi 5 nõudel  $k_{def}$  väärtus suurendada väärtuseni 1.

Kui paindest tingituna esinevad talas läbivajumid, siis kasutatakse läbipainde valemis inertsimomenti. Kui tuletakse nihkest tingitud läbipainet, siis nihke pindalaks on tegelik seinte ristlõikepindala.

Võttes inertsimomendi deformatsiooni arvutustesse on valemid järgnevad:

a) hetkelisel olukorras

$$I_{ef,inst} = I_f + \left( \frac{E_{mean,w}}{E_{mean,f}} \right) \cdot I_w \quad (3.33)$$

b) läbipainde lõpuolukorras

$$I_{ef,fin} = I_f + \left( \frac{E_{mean,w}}{E_{mean,f}} \right) \cdot \left( \frac{1 + k_{def,f}}{1 + k_{def,w}} \right) \cdot I_w \quad (3.34)$$

kus

$k_{def,f}$  on tala vöö materjali deformatsioonitegur;

$k_{def,w}$  on tala seina materjali deformatsioonitegur.

Nihkedeformatsiooni arvutamiseks saab kasutada meetodit, kus tala kujutegur on võetud ühtne ja kogu nihe on kantud edasi ainult tala seinte kaudu.

$$u = \frac{M_d}{G_{w,mean} \cdot A_w} \quad (3.35)$$

kus

$u$  - nihkedeformatsioon tala silde keskel hetkeolukorras, mm;

$M_d$  - silde keskel olev moment, ;

$G_{w,mean}$  - tala seina nihkemooduli keskväärtus;

$A_w$  - seina ristlõikepindala.

Tabelis 3.1. on antud valemid nihkest ja paindest tulenevatele läbipainetele nii lihttaladele kui ka konsoolsetele komposiittaladele nii hetkeolukorras kui ka lõpliku deformatsiooni olukorras.

Allpool on esitatud olukord, kus kasutuspiiriseisundis on õhukeseseinaline karptala sildega L ja see on koormatud lauskoormusega  $q_d$ , iga vöö elastsusmooduli



keskväärtus on  $E_f$ ,  $I_{inst}$  on inertsimoment hetkeolukorras ja  $I_{ef,fin}$  on inertsimoment lõpliku deformatsiooni olukorras, mõlemal seinal on täis ristlõikepindalad  $A_w$  ja nihkemooduli keskväärtused  $G_w$ , kus  $k_{def,f}$  ja  $k_{def,w}$  on defineeritud valemis 3.2. Sellises olukorras on kasutuspiirseisundis koormatud tala silde keskel esinev deformatsioon esitatud järgnevalt:

a) hetkelisel olukorras

$$u_{inst} = q \cdot \left( \frac{5 \cdot l^4}{384 \cdot E_f \cdot I_{ef,inst}} + \left( \frac{l^2}{8} \right) \cdot \left( \frac{1}{G_w \cdot A_w} \right) \right) \quad (3.36)$$

c) läbipainde lõpuolukorras

$$u_{fin} = q \cdot \left( \frac{5 \cdot l^4 \cdot (1 + k_{def,f})}{384 \cdot E_f \cdot I_{ef,fin}} + \left( \frac{l^2}{8} \right) \cdot \left( \frac{1 + k_{def,w}}{G_w \cdot A_w} \right) \right) \quad (3.37)$$

Läbipaine arvutatakse normatiivsete koormustega.

**Tabel 3.1.** Paindest ja nihkest tingitud läbipained puidust komposiitse ristlõikega lihttalal hetkelises ja lõpuolukorras [4]

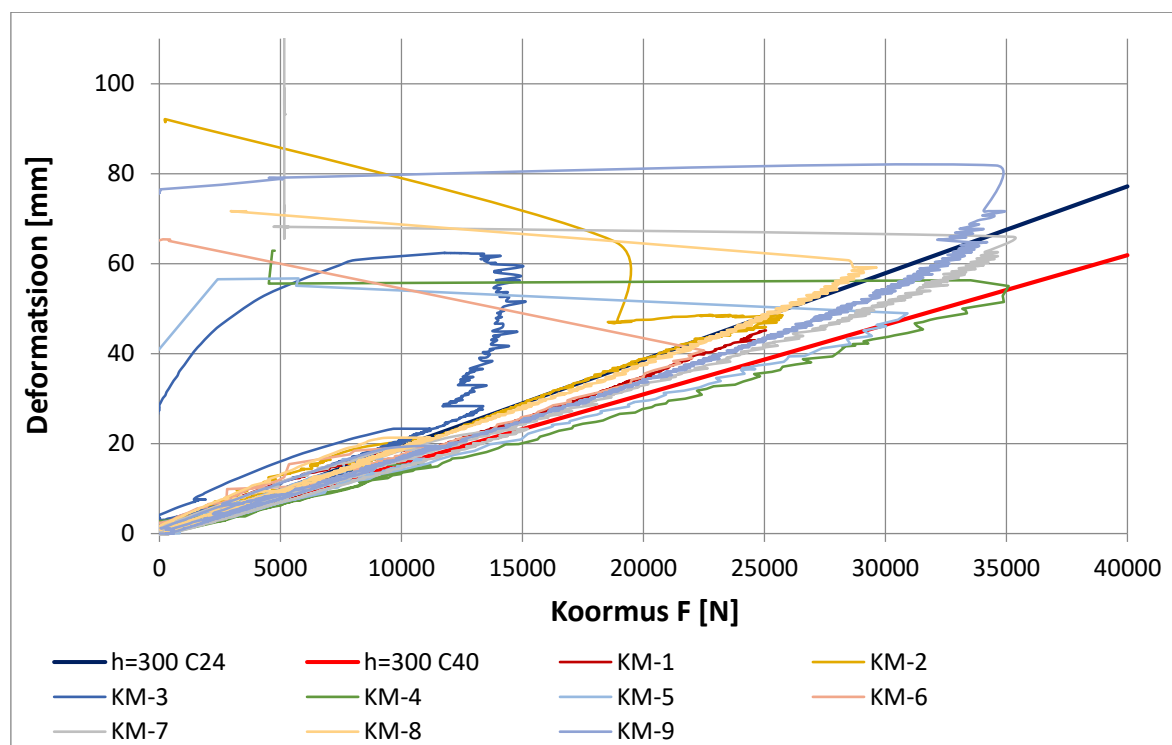
Koormamise viis	Paindest tingitud läbipaine	Nihkest tingitud läbipaine
Ühtlaselt jaotatud koormuse korral $q$ :		
Hetkelises olukorras:	$\frac{5}{384} \cdot \frac{q \cdot l^4}{E_{mean.f} \cdot I_{ef.inst}}$	$\frac{1}{8} \cdot \frac{q \cdot l^2}{A_w \cdot G_{w.mean}}$
Läbipainde lõpuolukorras:	$\frac{5}{384} \cdot \frac{q \cdot l^4 \cdot (1 + k_{def.f})}{E_{mean.f} \cdot I_{ef.fin}}$	$\frac{1}{8} \cdot \frac{q \cdot l^2 \cdot (1 + k_{def.w})}{A_w \cdot G_{w.mean}}$
Keskkohas punktkoormuse $F$ korral:		
Hetkelises olukorras:	$\frac{1}{48} \cdot \frac{F \cdot l^3}{E_{mean.f} \cdot I_{ef.inst}}$	$\frac{1}{4} \cdot \frac{F \cdot l}{A_w \cdot G_{w.mean}}$
Läbipainde lõpuolukorras:	$\frac{1}{48} \cdot \frac{F \cdot l^3 \cdot (1 + k_{def.f})}{E_{mean.f} \cdot I_{ef.fin}}$	$\frac{1}{4} \cdot \frac{F \cdot l \cdot (1 + k_{def.w})}{A_w \cdot G_{w.mean}}$
Toekohast võrdsel kaugusel $a$ kahe punktkoormuse $F$ korral:		
Hetkelises olukorras:	$\frac{F \cdot a}{24} \cdot \frac{(3 \cdot l^2 - 4a^2)}{E_{mean.f} \cdot I_{ef.inst}}$	$\frac{F \cdot a}{A_w \cdot G_{w.mean}}$
Läbipainde lõpuolukorras:	$\frac{F \cdot a}{24} \cdot \frac{(3 \cdot l^2 - 4 \cdot a^2) \cdot (1 + k_{def.f})}{E_{mean.f} \cdot I_{ef.fin}}$	$\frac{F \cdot a \cdot (1 + k_{def.w})}{A_w \cdot G_{w.mean}}$

## 4. KATSETULEMUSTE JA TEOREETILISTE ARVUTUSTE ANALÜÜS

### 4.1. Paindekatsete tulemused ja analüüs

Paindekatsete kokkuvõttev tabel on esitatud lisas 1, katsetatud talade katse- ja purunemisskeemid lisas 5 ning fotod talade purunemistest lisas 6. Katsete graafikutena asitatud andmed on kujutatud lisas 2 ja eraldi iga tala deformatsioonid vastavalt koormusele lisas 4.

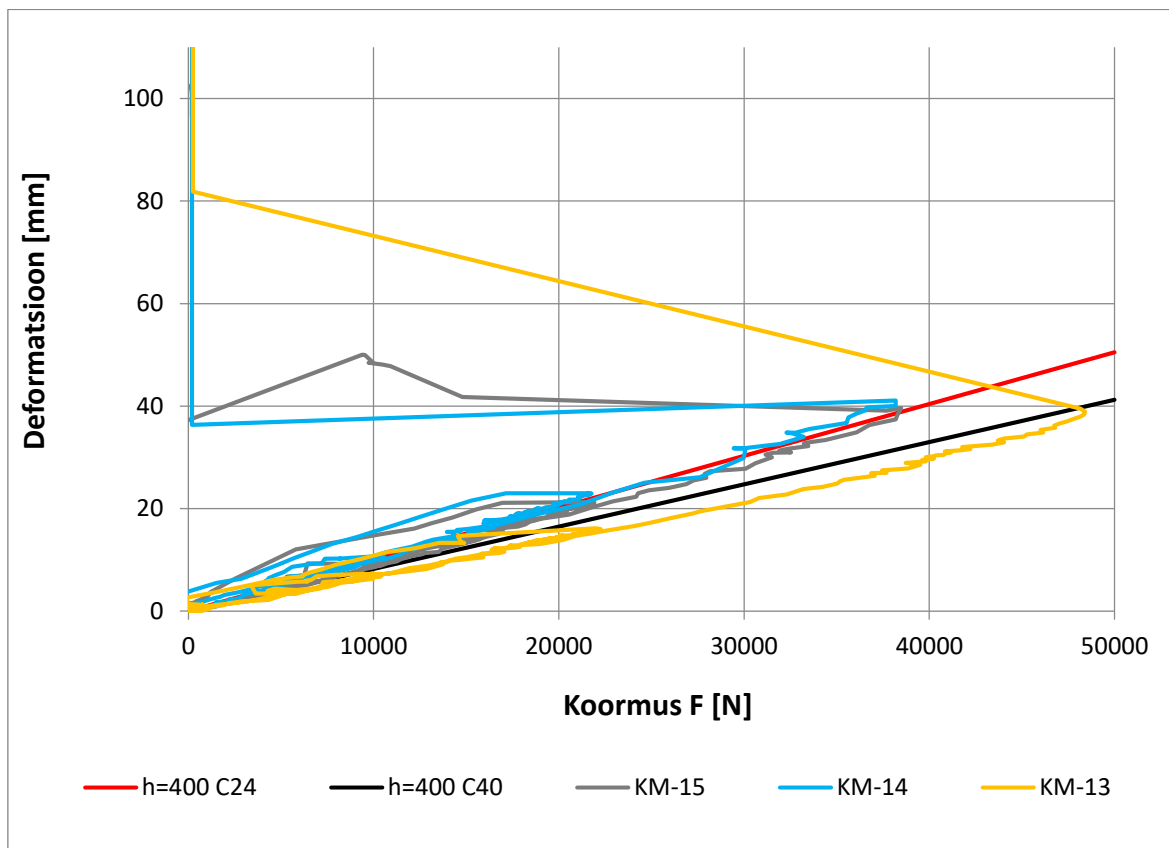
Karptalade läbipainded sõltuvalt koormuse suurusest on kokku koondatud joonisel 4.1 talad kõrgusega 300mm ja joonisel 4.2 talad kõrgusega 400mm. Graafikutele on võrdluseks lisatud arvutuslikud deformatsioonid, eeldades, et vöö materjalina on kasutatud puitu C24.



**Joonis 4.1.** 300mm kõrgusega liimliitega karptalade deformatsioonid paindekatsetel

Valdaval enamusel taladel jäid deformatsioonid väiksemaks kui arvutuslikud läbipainded. Erandiks osutus tala KM-3. Selle tala puhul oli ilmselt pikaajaline seismine laoruumi

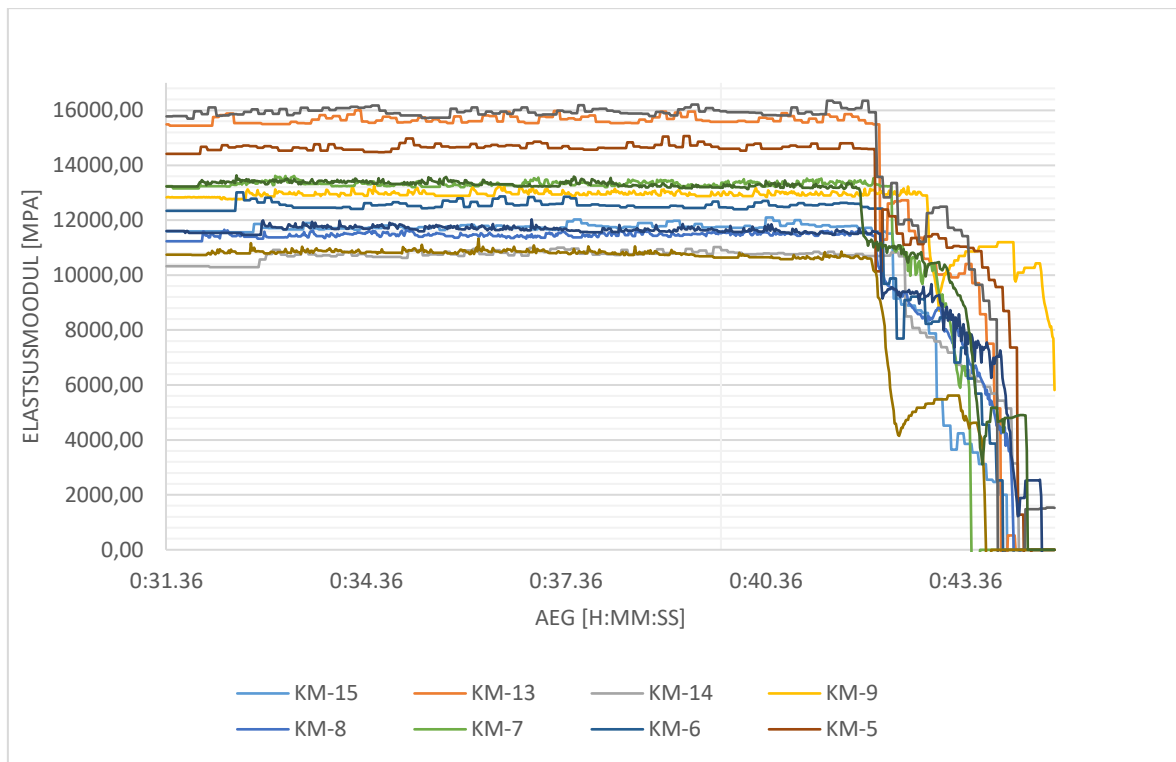
põrandal mõju avaldanud. Kahe katsekeha puhul, KM-4 ja KM-5, jäid läbivajumid väiksemaks isegi C40 tugevusklassiga puidust vöödega arvatatud läbipainetele. Kergtalade KM-7, KM-8 ja KM-8 toepunktist 380mm kaugusele freesitud 160mm suurune ava ei avaldanud kasutuspiiriseisundis taladele suurt mõju, kuna vajumid jäid arvatatud tala deformatsioonidest väiksemaks, seega sellises kohas sellise suurusega ava kommunikatsioonide läbiviimiseks ei nõrgesta kasutuspiiriseisundis tala.



**Joonis 4.2.** 400mm kõrgusega liimliitega karptalade deformatsioonid paindekatsel

Karptalad seina kõrgusega 400mm ei ületanud arvutuslikke deformatsioone. KM-13 läbipainded jäid väiksemaks ka tugevama puiduklassiga vööde arvutuslikule tulemusele. KM-14 ja KM-15 tulemused ühtisid C24 puiduklassiga vöödega kergtalade arvutustulemustega.

Konstruksiooni jäikuse hindamiseks arvutati katsekehade elastsusmoodulid valemite 2.1 ja 2.2 järgi. Saadud tulemused on esitatud joonisel 4.3. Graafikutelt on näha, et elastsusmoodul on kogu koormuse tõstmise perioodi vältel ühtlane. Elastsusmooduli koondtabel on konstrueeritud 7. koormustsükli jooksul, kus talale rakendatavat koormust suurendatakse eeldatava maksimumini. Iga karptala kohta on elastsusmooduli graafik töö lisas nr 7.



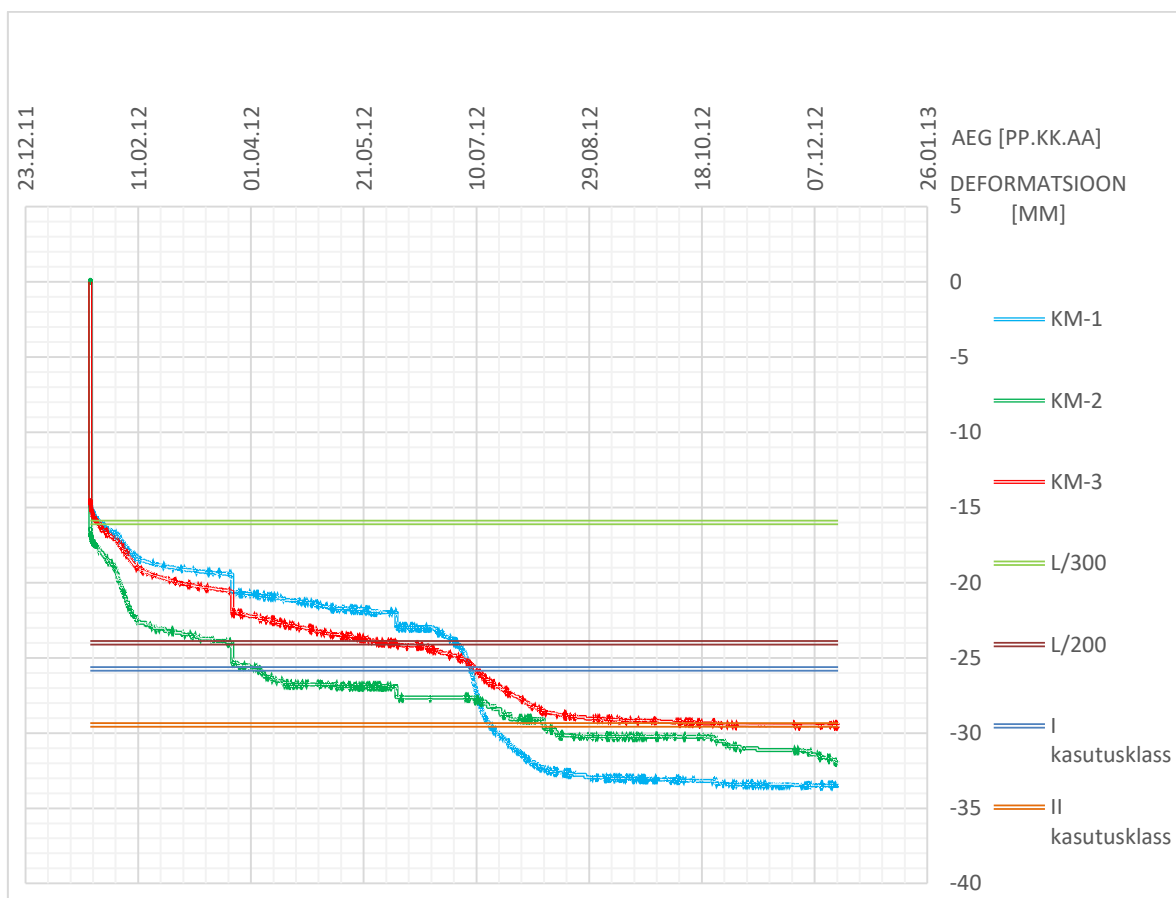
**Joonis 4.3.** Liimliitega karptalade elastsusmoodul ajas

Talade elastsuse hindamiseks koormati talasid tsükliliselt. Koormustsükkel koosnes kümnest etapist. Katsetulemused on toodud lisa 3 olevas tabelis. Eelpool mainitud Burgeri roomemudeli järgi on tsükkel nr 8 algne elastne taastumine ning tsükkel 9 on roome taastumine. Koheselt peale maksimaalse koormuse taladelt eemaldamist taastusid talad keskmiselt 87% ulatuses ning järgneva nelja minuti jooksul veel allesjäänud deformatsioonist keskmiselt 49,5%. tsüklilise koormamise

Pikaajaline paindekats sooritati taladega KM-1, KM-2 ja KM-3. Katse tulemused on toodud joonisel 4.4 lisaks iga tala kohta kõigi mõõtepunktide deformatsioonid (vt töö lisa nr 8). Graafikul on kõigi kolme tala läbipainded ajas ning lisatud on kaks piirväärtust. Üks joon tähistab tala lubatud läbipainet  $\frac{L}{300}$ , mis antud talade puhul on 16mm. Teine joon tähistab tala lubatud läbipainet  $\frac{L}{200}$ , mis 4,8m silde korral on 24mm.

Lõpliku läbipainde piirväärtuseni kogu koormusest  $\left(\frac{L}{300}\right)$  saavutasid talad esimese nädalaga. Alalisest koormusest tingitud läbipainde piirväärtuse  $\left(\frac{L}{200}\right)$  ületasid talad erinevalt – KM-1 161. päeval alates koormuse rakendamise algusest, KM-2 62. päeva- ja KM-3 133. päeva möödudes katse algusest. Täheldada võib roome kiirenemist suvekuudel,

ilmselt on see põhjustatud ruumi suhtelise õhuniiskuse tõusust. Selle sama perioodi ajal toimus ka KM-1 väljakiivumine, mistõttu teeb selle tala graafik järsu, tugeva languse. Joonisel 4.4 on toodud kaks arvutuslikku läbipainet lõpuolukorras, kus on arvestatud ka roometeguriga – valem tabelist 3.1. läbipainde lõpuolukorras toekohast võrdsel kaugusel a kahe punktkoormuse F korral. Üks joon tähistab läbipainet 1. kasutusklassi korral ja teine joon 2. kasutusklassi korral. Katsetulemused ületavad 1. kasutusklassi läbipainde lõpuolukorras sarnaselt  $\left(\frac{L}{200}\right)$  graafikuga, 2. kasutusklassi teoreetilised läbivajumid saavutavad talad 165 päeva möödudes katse algusest, kuid selle klassi arvutustulemused sarnanevad kõige rohkem tegelike katsetulemitega.



**Joonis 4.4.** Katsekehade deformatsioonid ajas pikaajalisel koormamisel

Koormamise perioodi lõpus eemaldati taladelt raskused ja jälgiti karptalade taastumist. Deformatsioonide jääk võrreldes algolukorraga oli vastavalt KM-1 puhul 2mm, KM-2 elastse läbipainde jääk jäi 6mm ning KM-3 talal 4mm.

## Kokkuvõte

Antud lõputöö eesmärk on uurida liimitud karptalade paindekandevõimet, erinevaid deformatsioone, taastumist ja käitumist pikaajalise koormuse all. Otsida materjali sarnaste talade kohta varasemalt teostatud katsetustest ja uurimustest nii eestis kui ka välismaal. Töö käigus sooritatakse teoreetilised arvutused antud talade kohta ja võrreldakse neid katsetulemustega. Samuti analüüsitakse saadud resultate varasemalt tehtud teadustöödega. Esmalt tutvuti uurimustöö alguses nii võõrkeelse kui kohaliku materjaliga ja varasemate uuringutega antud teemal.

Töö käigus koostati katseskeemid ja katsemetoodikad lühiajalistele purustatavatele paindekatsetele kui ja pikaajalise paindekandevõime katsele. Arvutusmetoodika aluseks on võetud Eesti Maaülikooli 2010 aasta lõpetanud Ivo Mäeseppa ja Ragnar Palmi diplomitöö. Arvutusmetoodika järgi määrati teoreetilised katsetulemused ja võrreldi neid katsetulemustega. Arvutuslikud tulemused ja katsetulemused koondati graafikutele lihtsustamaks töö tulemuste võrdlust ja analüüsi.

Katsetulemused näitasid, et liimliitega karptalade arvutuslikud elastsed läbipainded on usaldatavad ja reaalsed katsetused jäävad lubatud tolerantside piirsesse. Antud laadi talade elastsusmoodul on maksimaalne juba koormamise algfaasis ja püsib kogu koormamise jooksul ühtlane. Seda tüüpi kergtalade elastsusomadused on väga head, sest läbivajumid taastusid enam kui 90% ulatuses. Katsed näitasid ka, et tala seinast läbi freesitud 160mm suurune ava, toest 380mm kaugusel, kommunikatsioonide läbiviimiseks, ei nõrgestanud konstruktsiooni kasutuspiir seisundis.

Varasemaid uuringuid silmas pidades võib välja tuua, et seda tüüpi puitkomposiitkonstruktsioonid on oma tugevusomadustelt võrreldavad täispuidust konstruktsioonidega. Tala vööde paigutamine lapiti annab paremad tulemused. OSB plaatidest seinamaterjaliga talade omadused ja pikaajaline sooritusvõime on paremad kui vineeril, kuid OSB imab paremini niiskust ja seisund vettimisel halveneb oluliselt.

Mäesepp ja Palm uurisid erinevate liidetega koostatud karptalasisid – tulemuseks, et parim on tala vööd ja sein ühendada liimiga. Seetõttu tehti sarnaseid katsekehasid juurde, et katseandmeid täpsustada.

Katsetati ka talade toimimist vahelaepaneelina. Tulemus näitas, et talade arvutamine lihttalana rahuldab katsetulemusi kolme talaga vahelaekonstruktsiooni paneeli katsetusel.

Pikaajalise katse kokkuvõtteks võib öelda, et talade arvutamise osavaruteid roome näol ei tohi alahinnata. Talade roome on ajafunktsioon, selle kiirus sõltub ümbritseva keskkonna suhtelisest õhuniiskusest ja katsekeha enda niiskussisaldusest. Uuritud kirjanduse põhjal võib samas väita, et puitkomposiit-materjalist kergtalade roome näitajad on paremad kui täispuidust taladel ning kõrge nihkele vastupidavusega plaatide kasutamisel tala seinas saab pikas perspektiivis roome minimeerida.

Antud diplomitöö tulemusi ja graafikuid saab kasutada edasiste täiendavate uuringute teostamisel. Tasub katsetada erineva ristlõikega talasid, uurida kontrollitud õhuniiskuse juures talade kandevõimet. Karptalade roome hindamiseks peaks teostama veel samalaadseid pikaajalise koormuse katseid ja kaaluma võimalust ümber defineerida roometegurid.



## Kasutatud kirjandus

- [1] R. Palm ja I. Mäesepp, Õhukeseseinaliste karptalade uurimine, Tartu: Eesti Maaülikool, 2010.
- [2] K. Matsumoto, Y. Ohashi ja T. Hirai, Evaluation of Mechanical Properties and Adjustment Factors of Wooden I-joists for Structural Design, 2010.
- [3] B. Misztal, Creep of beams of wood and wood-based materials under transverse load, 2000.
- [4] J. Porteous ja A. Kermani, Structural timber design to Eurocode 5 2nd Edition, Wiley-Blackwell, 2013.
- [5] A. B. Jahromi, Development and evaluation of composite insulated beams, Edinburgh: School of the Built Environment, 2006.
- [6] R. J. Leichti ja R. C. Tang, Effect of creep on the reliability of sawn lumber and wood-composite I-beams, Great Britain: Pergamon Press plc, 1989.
- [7] E. Borgström, Design of timber structures. Structural aspects of timber construction. Volume 1. Edition 2:2016, Stockholm: Swedish Forest Industries Federation, 2016.
- [8] FOREST SERVICE UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, HARDBOARD - WEBBED I-BEAMS: EFFECTS OF LONG-TERM LOADING AND LOADING ENVIRONMENT, WISCONSIN: U.S. GOVERNMENT PRINTING OFFICE:, 1978.
- [9] EVS-EN 380:1999, Puittarindid. Staatilise koormamise põhialused, Tallinn: Eesti Standardikeskus, 1999.
- [10] EVS-EN 408:2010+A1:2012, Puitkonstruktsioonid. Ehituspuit ja liimpuit. Mõnede füüsikaliste ja mehaaniliste omaduste määramine, Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2012.
- [11] Ahlborn, Product Catalog, [www.ahlborn.com](http://www.ahlborn.com), 2011/2012.
- [12] Plywood association of Australia LTD, Design guide for plywood webbed beams, Newstead: Plywood association of Australia LTD, 1989.
- [13] T. Masso, Ehituskonstruktori käsiraamat, Tallinn: Autorid ja EHITAME kirjastus, 2010.

- [14] British Standards Institution, BS EN 408:1995 Timber structures - Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties, London: British Standards Institution, 1999.

## Lisad

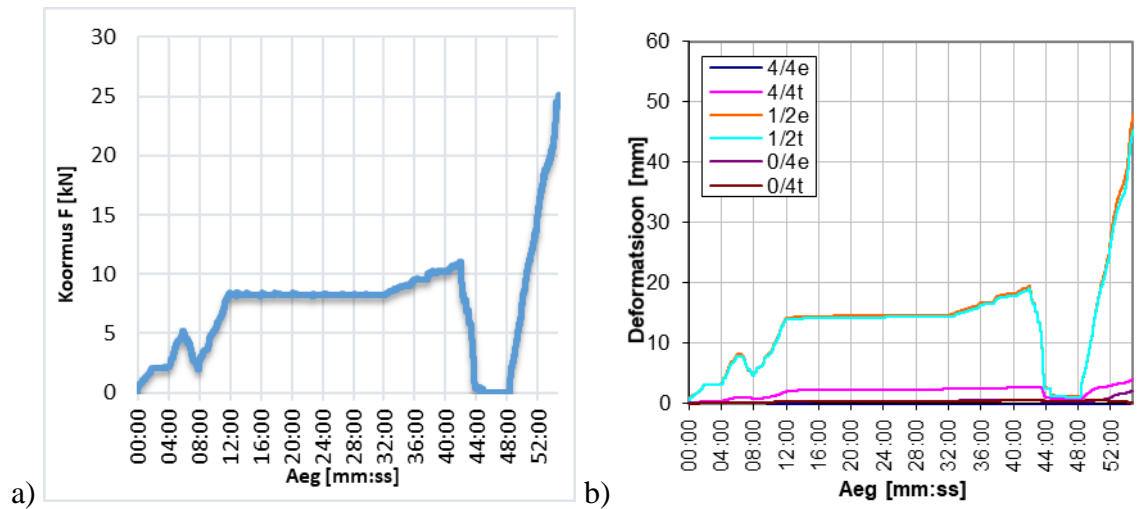
LISA 1. Katsetuste kokkuvõtte.....	48
LISA 2. Paindekatse talade koormamine ja deformatsioonid ajaskaalal.....	49
LISA 3. Liimitud karptalade deformatsioonid tsüklilisel koormamisel .....	54
LISA 4. Liimitud karptalade deformatsioonid vastavalt koormusele.....	55
LISA 5 Liimitud karptalade katse- ja purunemisskeemid .....	57
LISA 6. Liimitud karptalade purunemispildid .....	72
LISA 7 Liimliitega karptalade elastsusmoodul ajas tala koormamisel kuni tala kandevoime kaotuseni .....	80
LISA 8. Pikaajalise katse deformatsioon ajas .....	82

## LISA 1. Katsetuste kokkuvõtte

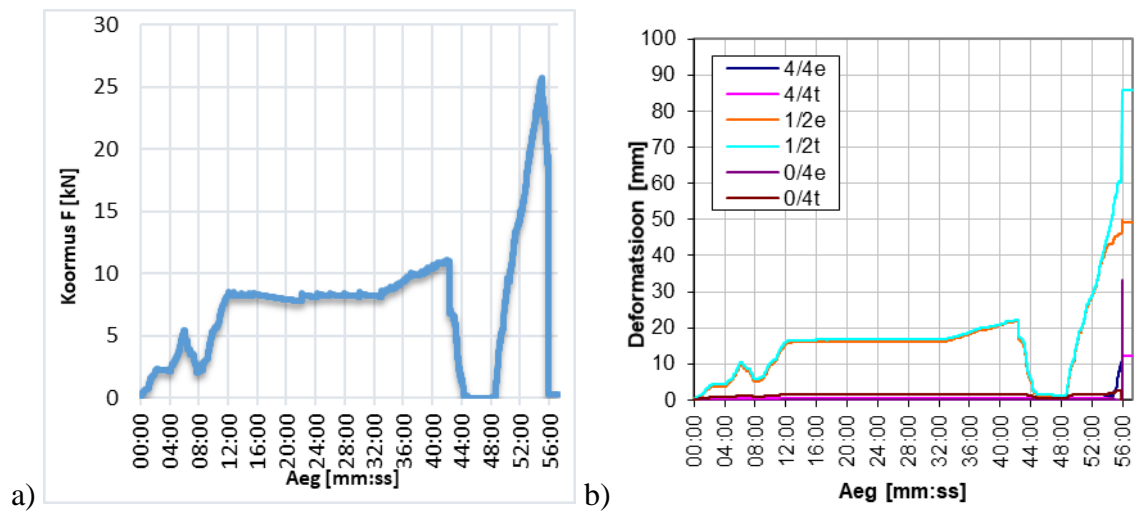
Tabel L1.1.Talade nomenklatuur, parameetrid ja paindekatsitulemused

	Tala vöö		Tala sein OSB			Kinnitusmeetod			Sille	a	L/300	F <sub>max</sub>	F <sub>max</sub>	F <sub>max</sub> /2	M <sub>max</sub>	=>600mm	F	Tala katsetus	Märkused pärast katset
	kõrgus	laius	paksus	kõrgus	Ava	Metalliide	samm (mm)	Liim	[m]	[m]	[mm]	[bar]	[kN]	[kN]	[kN*m]	[kN*m]	[kN/m <sup>2</sup> ]		
KM-1	70	45	8	300		Klamber 1,3x7,6x32	70 +		4,8	1,5	16	51	25,07	12,54	18,80	11,28	2,68	18.05.2018	Jõu rakendamise punkti lähedal purunes alumine vöö
KM-2	70	45	8	300		Klamber 1,3x7,6x32	70 +		4,8	1,5	16	52,4	25,75	12,88	19,31	11,59	2,75	18.05.2018	Jõu rakendamise punkti lähedal purunes alumine vöö
KM-3	70	45	8	300		Klamber 1,3x7,6x32	70 +		4,8	1,5	16	30,8	15,14	7,57	11,36	6,81	1,62	18.05.2018	Jõu rakendamise punkti lähedal purunesid OSB seinad ning alumine vöö, OSB tuli jõupunktist otsani vöö küljest lahti
KM-4	70	45	8	300		Klamber 1,3x7,6x32	70 +		4,8	1,5	16	72,2	35,09	17,55	26,32	15,79	3,75	16.05.2011	Jõu rakendamise punkti lähedal purunes OSB ning eraldus ülemisest vööst, alumine vöö purunes
KM-5	70	45	8	300		Klamber 1,3x7,6x32	70 +		4,8	1,5	16	63,8	30,92	15,46	23,19	13,91	3,30	16.05.2011	Jõu rakendamise punkti lähedal purunes OSB ning eraldus ülemisest ja alumisest vööst
KM-6	70	45	8	300		Klamber 1,3x7,6x32	70 +		4,8	1,5	16	47	22,51	11,26	16,88	10,13	2,40	16.05.2011	Purunes alumine vöö keskteljelt, plaadil samas kohas jätkud (ilmselt tootmisviga)
KM-7	70	45	8	300	d=160mm toepunktist 380mm kaugusel	Klamber 1,3x7,6x32	70 +		4,8	1,5	16	72,6	35,24	17,62	26,43	15,86	3,76	16.05.2011	Ava kohalt läks katki põikjõule
KM-8	70	45	8	300	d=160mm toepunktist 380mm kaugusel	Klamber 1,3x7,6x32	70 +		4,8	1,5	16	61,2	29,64	14,82	22,23	13,34	3,17	16.05.2011	Nähtavasti kiivus tala välja ja purunes toele pingestunud täiendava lisapinge tõttu
KM-9	70	45	8	300	d=160mm toepunktist 380mm kaugusel	Klamber 1,3x7,6x32	70 +		4,8	1,5	16	71,4	34,95	17,48	26,21	15,73	3,73	17.05.2011	Ava kohalt läks katki põikjõule
KM-13	70	45	8	400		Klamber 1,3x7,6x32	70 +		4,8	1,5	12	99,4	48,41	24,21	36,31	21,78	5,17	17.05.2011	Purunes keskelt alumine vöö
KM-14	70	45	8	400		Klamber 1,3x7,6x32	70 +		4,8	1,5	12	78,7	38,19	19,10	28,64	17,19	4,08	17.05.2011	Purunes keskelt alumine ja ülemine vöö
KM-15	70	45	8	400		Klamber 1,3x7,6x32	70 +		4,8	1,5	12	79,2	38,48	19,24	28,86	17,32	4,11	17.05.2011	Jõu rakendamise punkti lähedal purunes OSB ning eraldus ülemisest vööst
Paneel KMP-1																			
KM-10	70	45	8	300		Klamber 1,3x7,6x32	70 +		4,8	1,5	16	60,9	29,80	14,90	22,35	13,41	3,18	17.05.2011	Jõu rakendamise punkti lähedal purunes OSB ning alumine vöö purunes
KM-11	70	45	8	300		Klamber 1,3x7,6x32	70 +		4,8	1,5	16	60,9	29,80	14,90	22,35	13,41	3,18	17.05.2011	Alumine vöö purunes
KM-12	70	45	8	300		Klamber 1,3x7,6x32	70 +		4,8	1,5	16	60,9	29,80	14,90	22,35	13,41	3,18	17.05.2011	Jäi paneelis katsetusel terveks

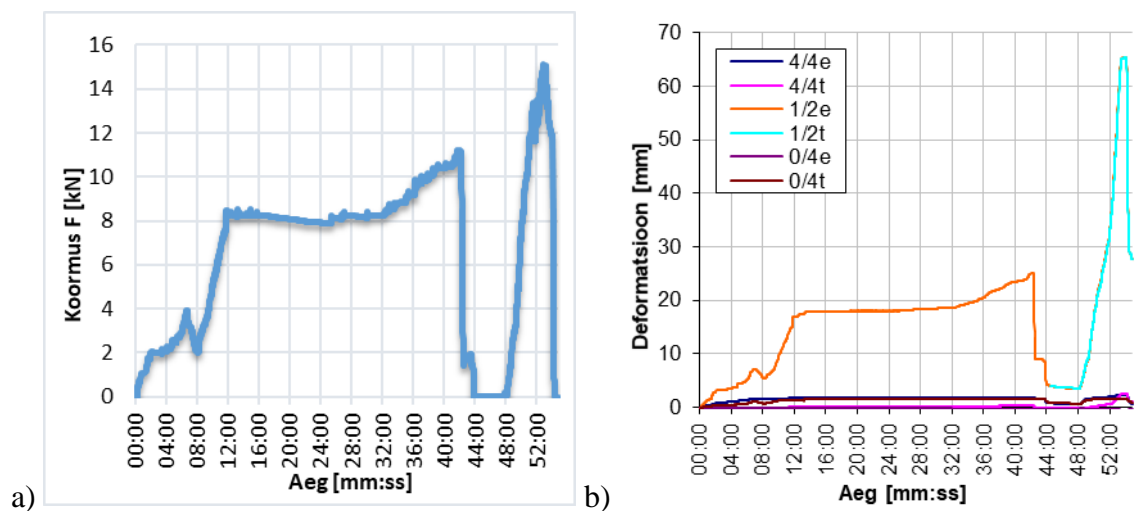
## LISA 2. Paindekatse talade koormamine ja deformatsioonid ajaskaalal



Joonis L2.1 Tala KM-1 paindekatse a) koormused ajaskaalal, b) deformatsioonid ajaskaalal

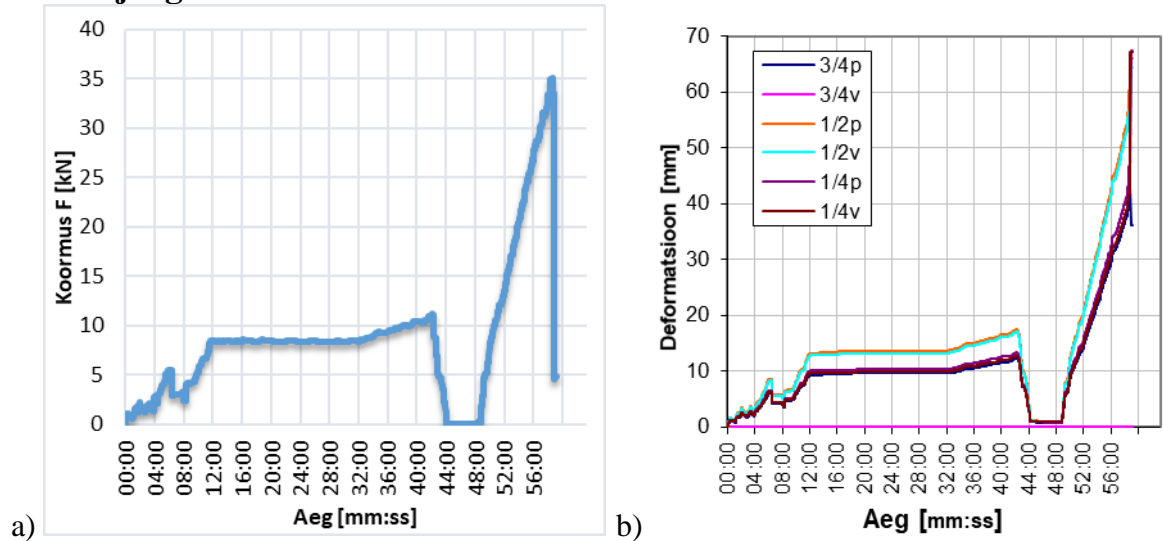


Joonis L2.2 Tala KM-2 paindekatse a) koormused ajaskaalal, b) deformatsioonid ajaskaalal

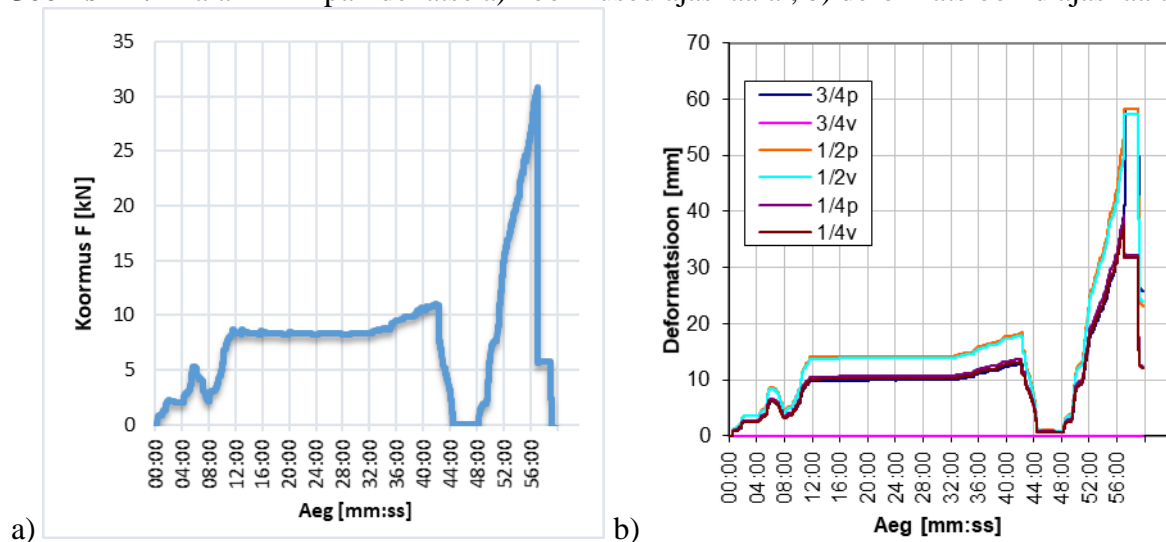


Joonis L2.3 Tala KM-3 paindekatse a) koormused ajaskaalal, b) deformatsioonid ajaskaalal

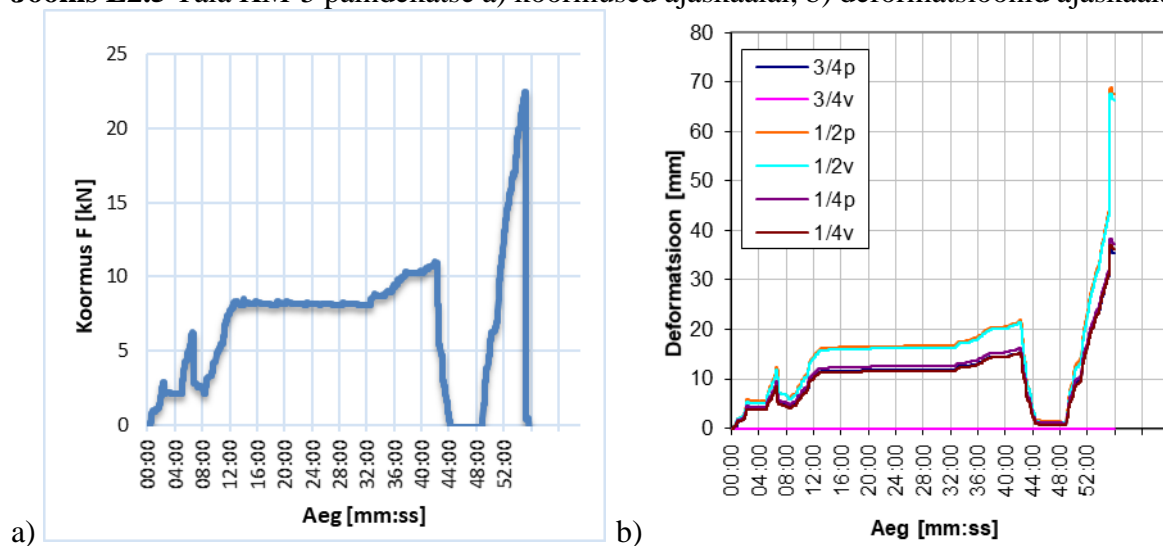
## Lisa 2 järg



Joonis L2.4 Tala KM-4 paindekatsa a) koormused ajaskaalal, b) deformatsioonid ajaskaalal

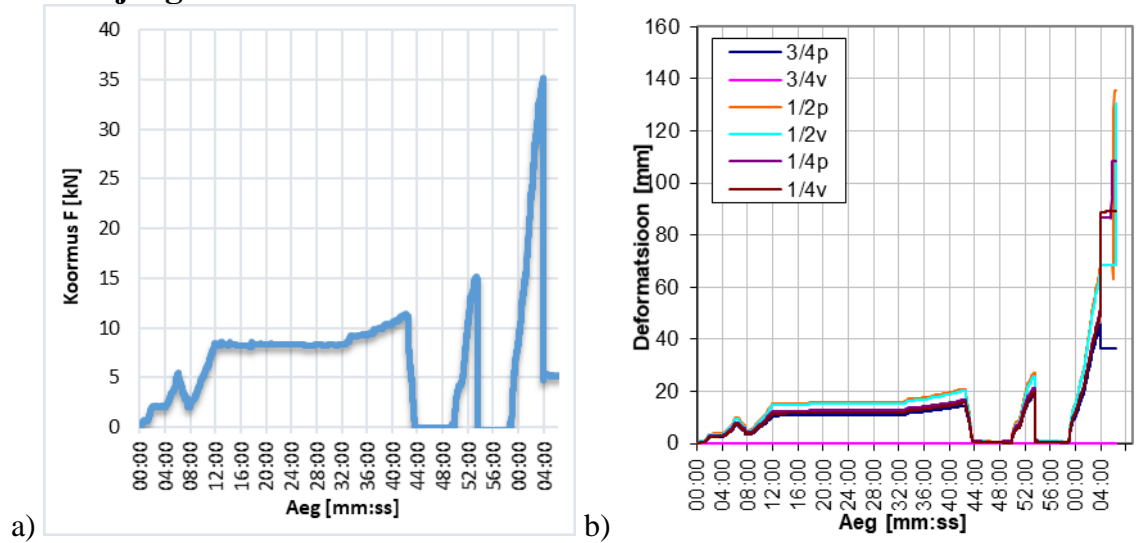


Joonis L2.5 Tala KM-5 paindekatsa a) koormused ajaskaalal, b) deformatsioonid ajaskaalal

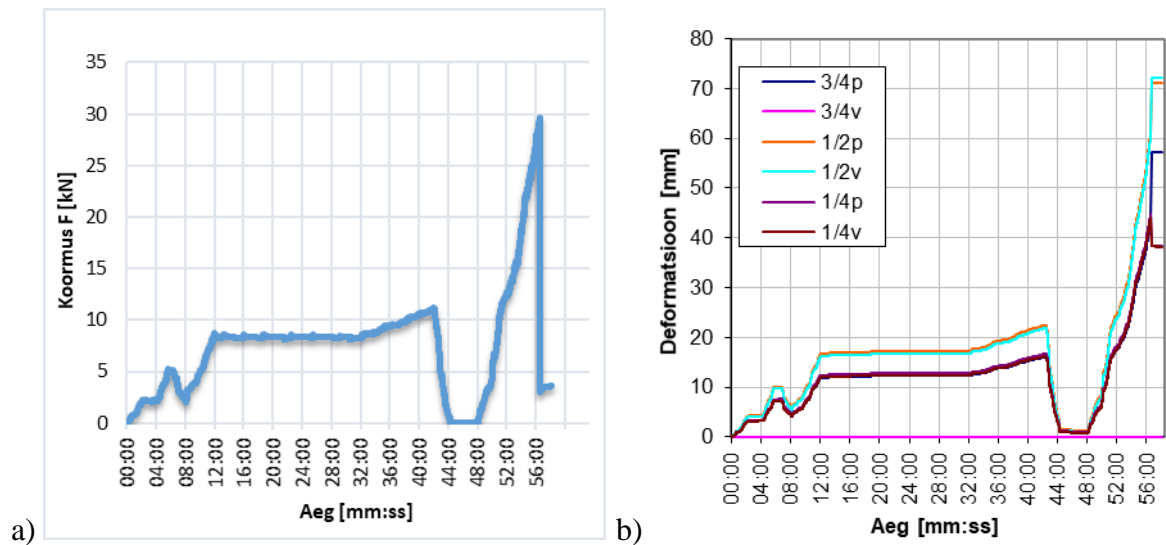


Joonis L2.6 Tala KM-6 paindekatsa a) koormused ajaskaalal, b) deformatsioonid ajaskaalal

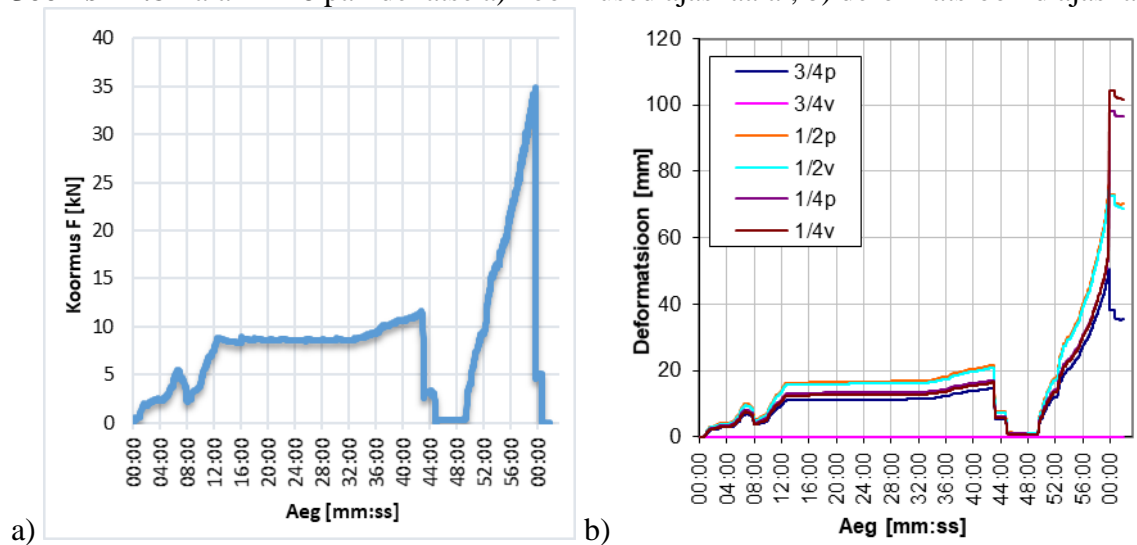
## Lisa 2 järg



Joonis L2.7 Tala KM-7 paindekatsed a) koormused ajaskaalal, b) deformatsioonid ajaskaalal

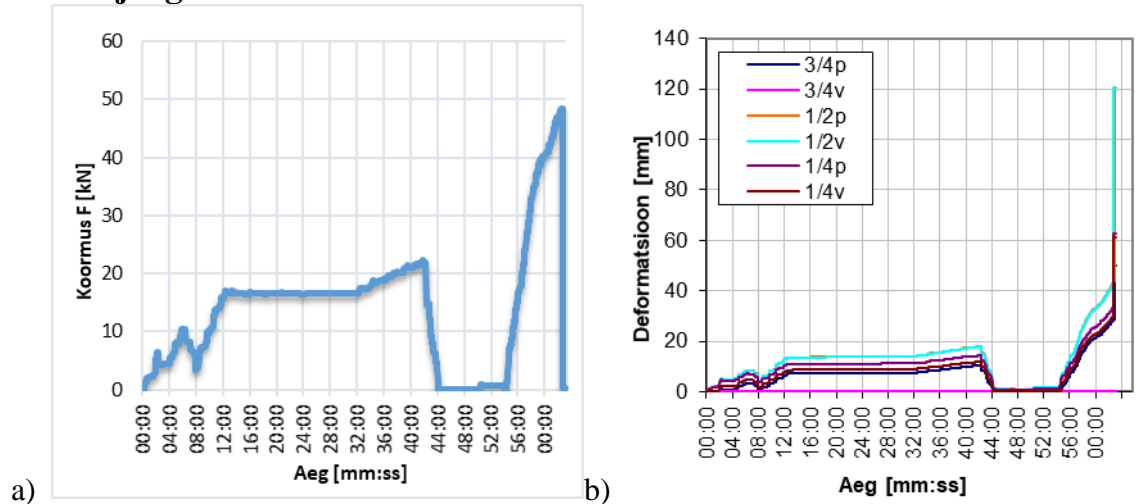


Joonis L2.8 Tala KM-8 paindekatsed a) koormused ajaskaalal, b) deformatsioonid ajaskaalal

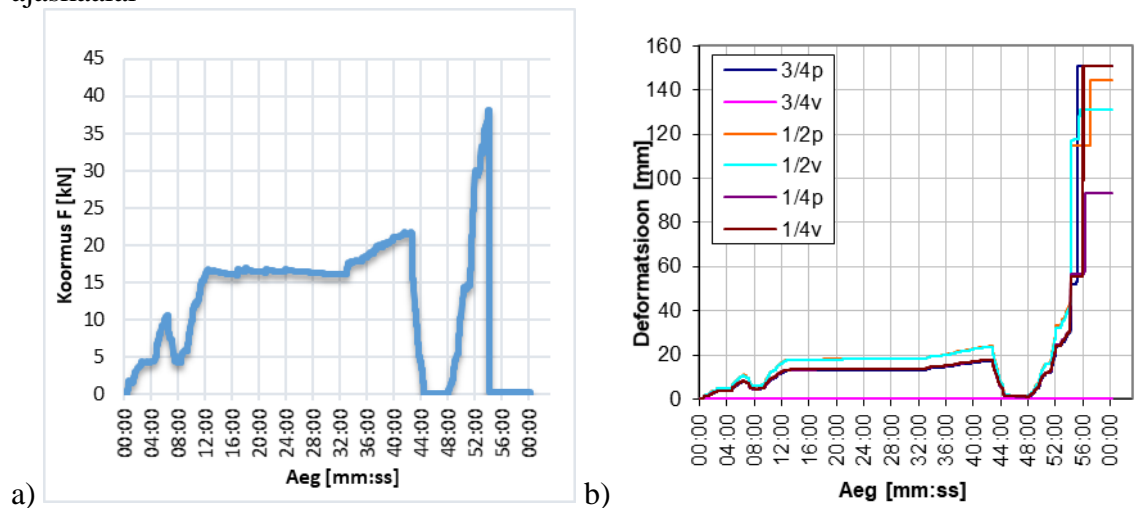


Joonis L2.9 Tala KM-9 paindekatsed a) koormused ajaskaalal, b) deformatsioonid ajaskaalal

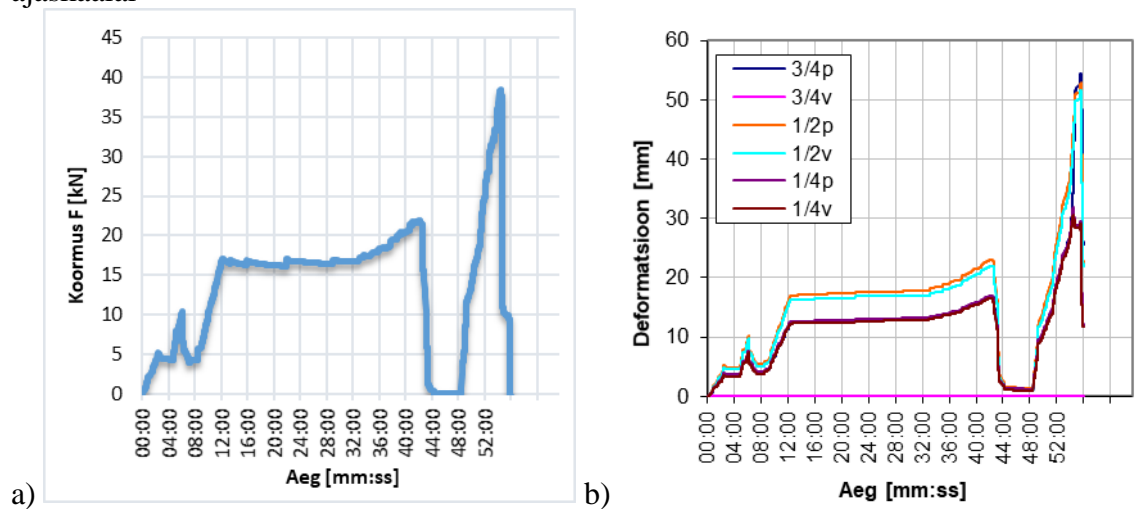
## Lisa 2 järg



**Joonis L2.10** Tala KM-13 painekatse a) koormused ajaskaalal, b) deformatsioonid ajaskaalal



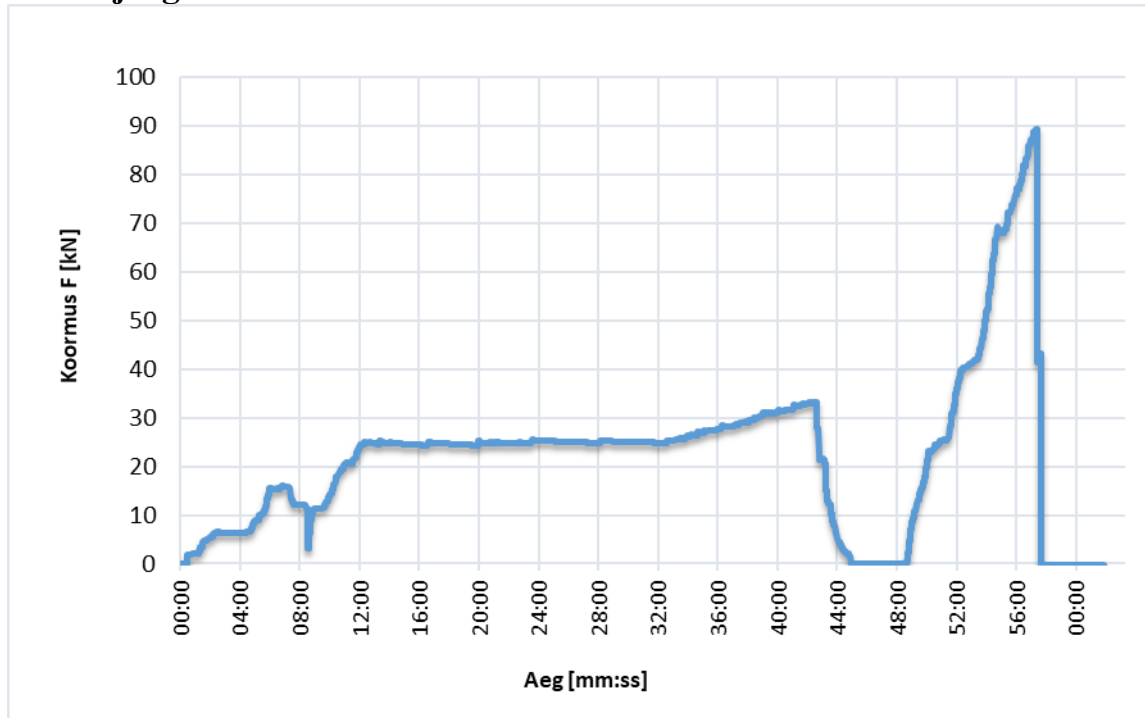
**Joonis L2.11** Tala KM-14 painekatse a) koormused ajaskaalal, b) deformatsioonid ajaskaalal



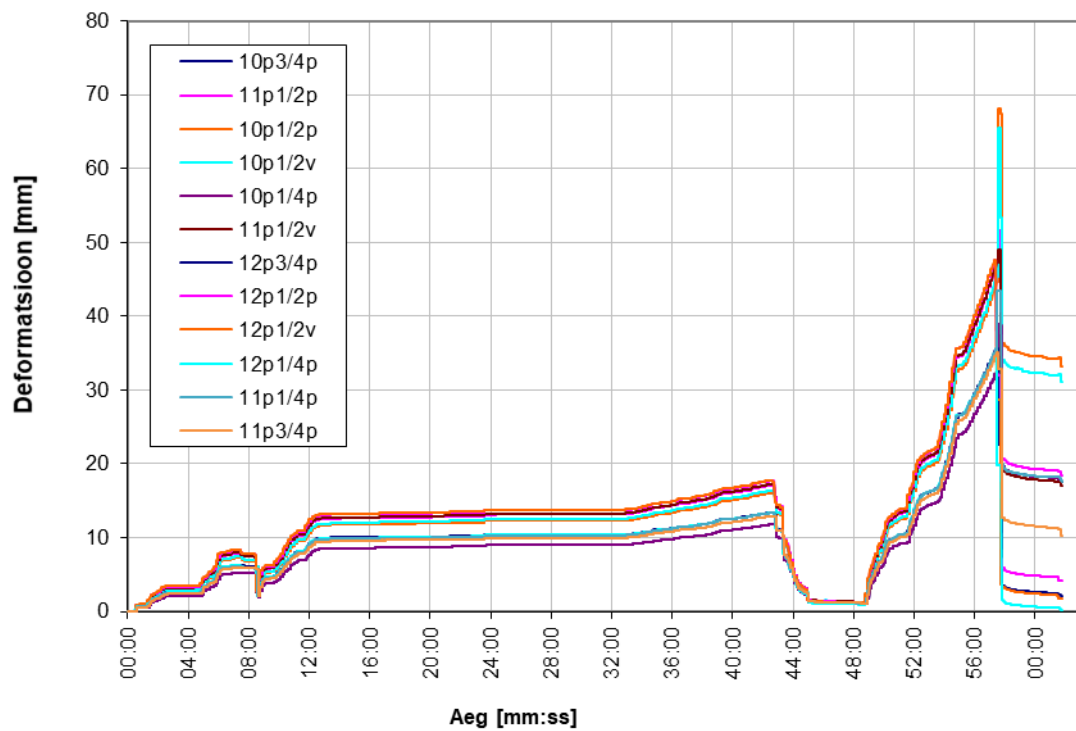
**Joonis L2.12** Tala KM-15 painekatse a) koormused ajaskaalal, b) deformatsioonid ajaskaalal



## Lisa 2 järg



Joonis L2.13 Paneeli KMP-1 paindekatses koormused ajaskaalal



Joonis L2.14 Paneeli KMP-1 paindekatses deformatsioonid ajaskaalal

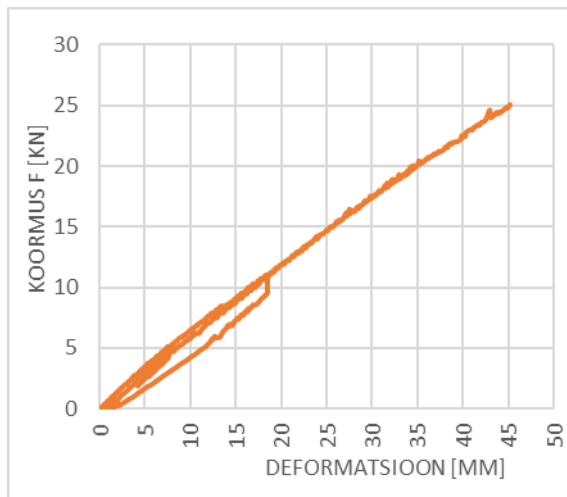
### LISA 3. Liimitud karptalade deformatsioonid tsüklilisel koormamisel

Tsükli nr	1			2			3			4			5		
Siirded tsüklis	Alg def	Löpp def	Def muut	Alg def	Löpp def	Def muut	Alg def	Löpp def	Def muut	Alg def	Löpp def	Def muut	Alg def	Löpp def	Def muut
Tala nr	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
KM-1	0	3,04	-3,04	3,04	3,18	-0,14	3,18	7,97	-4,79	7,97	4,51	3,46	4,51	14,06	-9,55
KM-2	0	3,67	-3,67	3,67	4,06	-0,39	4,06	10,04	-5,98	10,04	5,59	4,45	5,59	15,76	-10,17
KM-3	0	3,19	-3,19	3,19	3,52	-0,33	3,52	4,82	-1,3	4,82	5,67	-0,85	5,67	17	-11,33
KM-4	0	3,27	-3,27	3,27	3,33	-0,06	3,27	8,34	-5,07	8,34	5,64	2,7	5,64	13	-7,36
KM-5	0	3,29	-3,29	3,29	3,61	-0,32	3,61	8,57	-4,96	8,57	4,44	4,13	4,44	13,9	-9,46
KM-6	0	3,32	-3,32	3,32	5,32	-2	5,32	9,36	-4,04	9,36	6,78	2,58	6,78	14,26	-7,48
KM-7	0	3,45	-3,45	3,45	3,8	-0,35	3,8	9,44	-5,64	9,44	4,94	4,5	4,94	14,99	-10,05
KM-8	0	3,75	-3,75	3,75	4,32	-0,57	4,32	9,88	-5,56	9,88	6,19	3,69	6,19	16,4	-10,21
KM-9	0	3,11	-3,11	3,11	4,11	-1	4,11	7,92	-3,81	7,92	5,31	2,61	5,31	13,72	-8,41
KM-10	0	2,32	-2,32	2,32	2,93	-0,61	2,93	6,37	-3,44	6,37	6,11	0,26	6,11	10,78	-4,67
KM-11	0	2,54	-2,54	2,54	3,2	-0,66	3,2	6,97	-3,77	6,97	3,21	3,76	3,21	11,83	-8,62
KM-12	0	2,76	-2,76	2,76	3,4	-0,64	3,4	7,58	-4,18	7,58	2,75	4,83	2,75	12,33	-9,58
KM-13	0	4,34	-4,34	4,34	4,87	-0,53	4,87	8,37	-3,5	8,37	4,41	3,96	4,41	12,78	-8,37
KM-14	0	3,68	-3,68	3,68	4,7	-1,02	4,7	10,09	-5,39	10,09	6,02	4,07	6,02	16,23	-10,21
KM-15	0	3,55	-3,55	3,55	4,69	-1,14	4,69	9,21	-4,52	9,21	5,25	3,96	5,25	15,49	-10,24

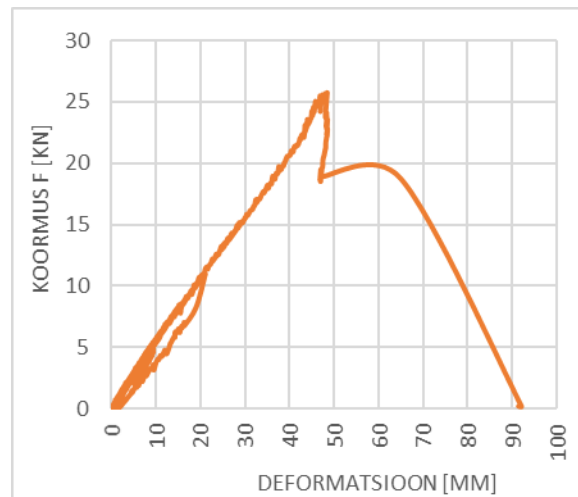
  

Tsükli nr	6			7			8			9			Löpp def - alg def F=0 kN
Siirded tsüklis	Alg def	Löpp def	Def muut	Alg def	Löpp def	Def muut	Alg def	Löpp def	Def muut	Alg def	Löpp def	Def muut	
Tala nr	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
KM-1	14,06	14,47	-0,41	14,47	19,29	-4,82	19,29	2,52	16,77	2,52	1,07	1,45	1,07
KM-2	15,76	16,56	-0,8	16,56	21,9	-5,34	21,9	3,46	18,44	3,46	1,18	2,28	1,18
KM-3	17	18,5	-1,5	18,5	25	-6,5	25	4,38	20,62	4,38	3,52	0,86	3,52
KM-4	13	13,42	-0,42	13,42	17,14	-3,72	17,14	3,34	13,8	3,34	0,95	2,39	0,95
KM-5	13,9	14,04	-0,14	14,04	18,07	-4,03	18,07	3,29	14,78	3,29	0,89	2,4	0,89
KM-6	14,26	16,47	-2,21	16,47	21,54	-5,07	21,54	1,57	19,97	1,57	1,24	0,33	1,24
KM-7	14,99	15,63	-0,64	15,63	20,58	-4,95	20,58	1,6	18,98	1,6	0,65	0,95	0,65
KM-8	16,4	17,02	-0,62	17,02	22,09	-5,07	22,09	1,98	20,11	1,98	1,13	0,85	1,13
KM-9	13,72	16,49	-2,77	16,49	20,78	-4,29	20,78	1,48	19,3	1,48	1,02	0,46	1,02
KM-10	10,78	12,44	-1,66	12,44	16,07	-3,63	16,07	2,55	13,52	2,55	1,19	1,36	1,19
KM-11	11,83	13,24	-1,41	13,24	17	-3,76	17	2,31	14,69	2,31	1,29	1,02	1,29
KM-12	12,33	13,74	-1,41	13,74	17,58	-3,84	17,58	1,56	16,02	1,56	1,2	0,36	1,2
KM-13	12,78	13,92	-1,14	13,92	18,03	-4,11	18,03	2,83	15,2	2,83	0,89	1,94	0,89
KM-14	16,23	18,18	-1,95	18,18	23,55	-5,37	23,55	3,56	19,99	3,56	1,4	2,16	1,4
KM-15	15,49	17,46	-1,97	17,46	22,42	-4,96	22,42	2,42	20	2,42	1,19	1,23	1,19

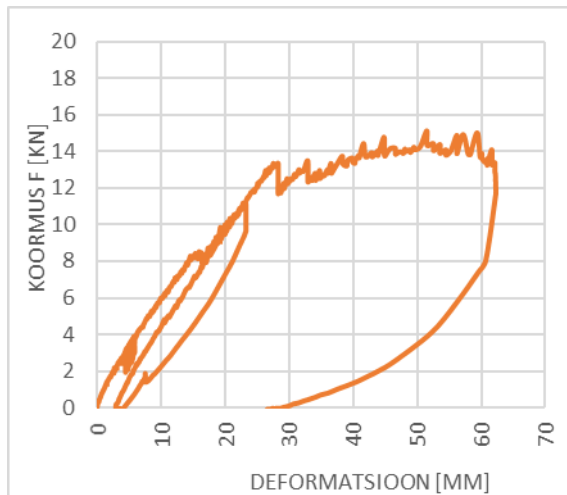
## LISA 4. Liimitud karptalade deformatsioonid vastavalt koormusele



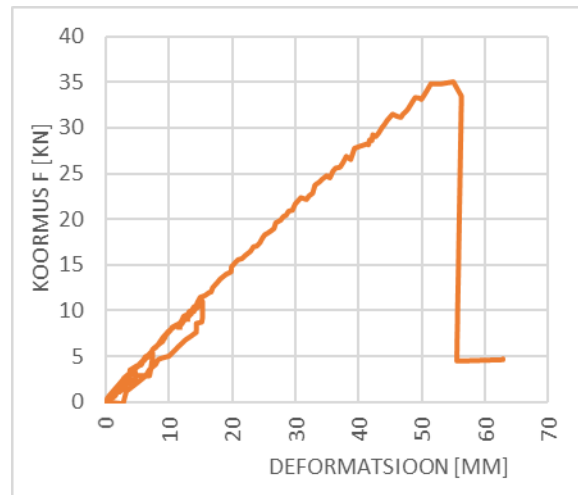
**Joonis L4.1** Tala KM-1 deformatsioon vastavalt koormusele



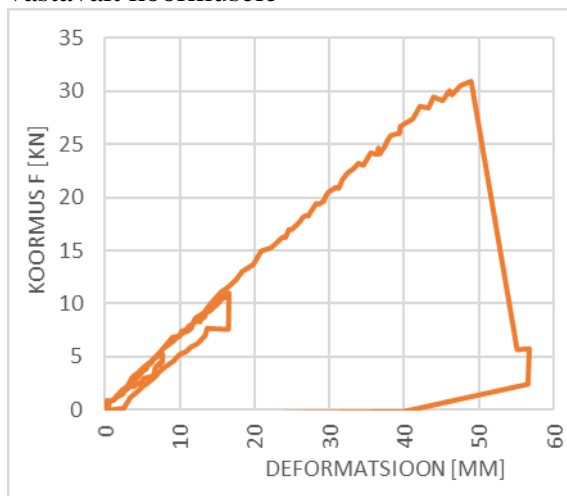
**Joonis L4.2** Tala KM-2 deformatsioon vastavalt koormusele



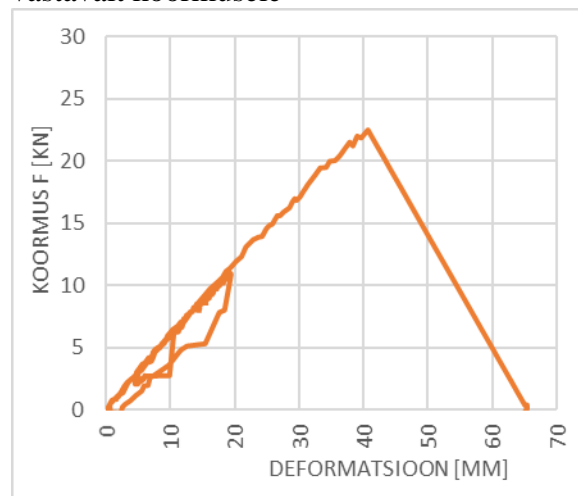
**Joonis L4.3** Tala KM-3 deformatsioon vastavalt koormusele



**Joonis L4.4** Tala KM-4 deformatsioon vastavalt koormusele

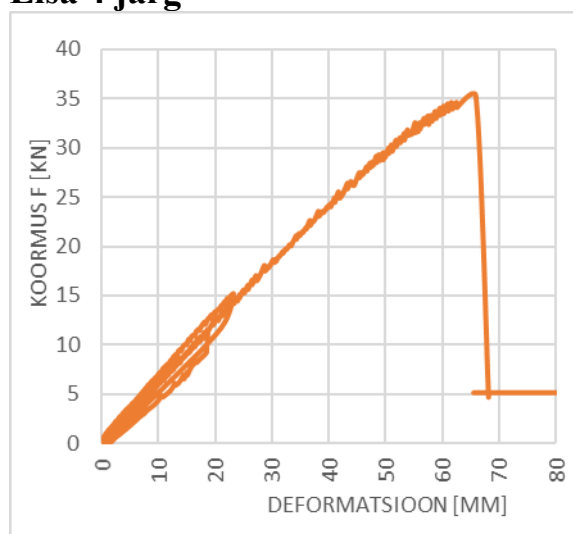


**Joonis L4.5** Tala KM-5 deformatsioon vastavalt koormusele

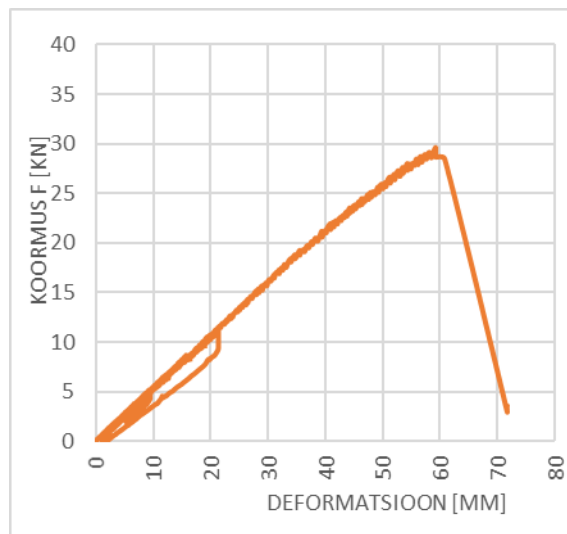


**Joonis L4.6** Tala KM-6 deformatsioon vastavalt koormusele

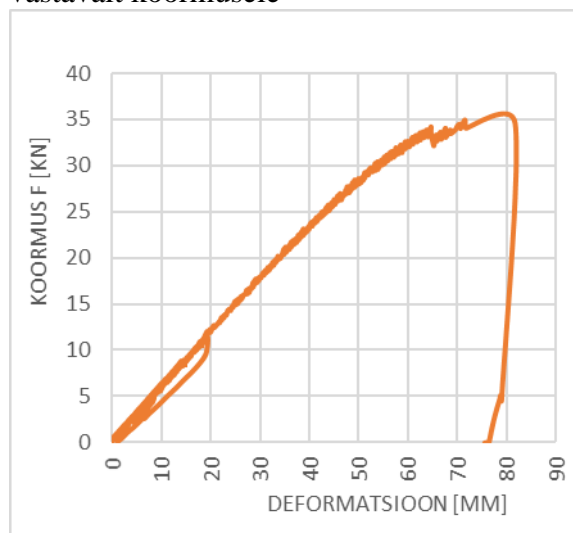
## Lisa 4 järg



**Joonis L4.7** Tala KM-7 deformatsioon vastavalt koormusele



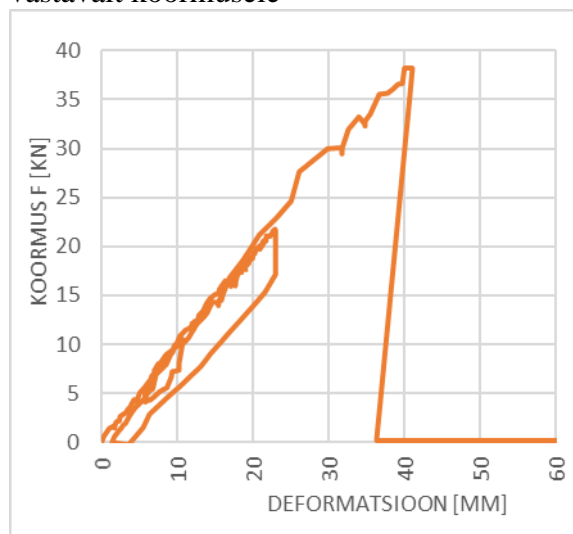
**Joonis L4.8** Tala KM-8 deformatsioon vastavalt koormusele



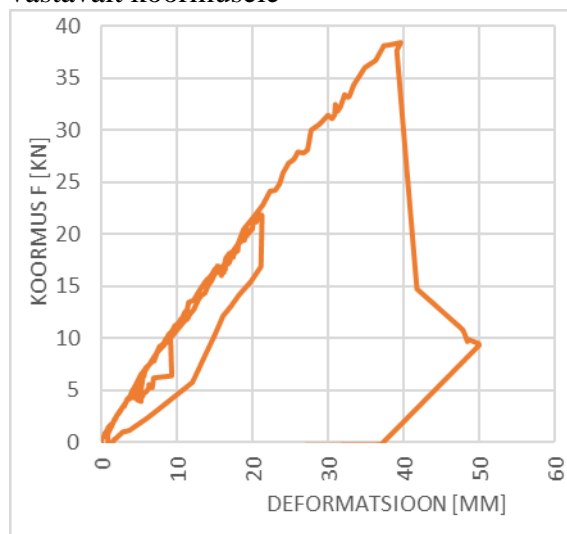
**Joonis L4.9** Tala KM-9 deformatsioon vastavalt koormusele



**Joonis L4.10** Tala KM-13 deformatsioon vastavalt koormusele



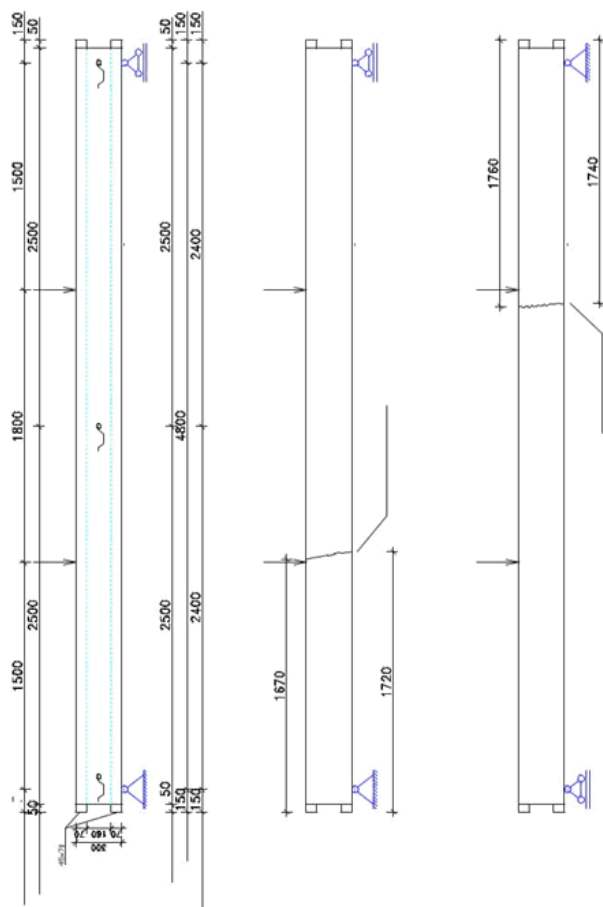
**Joonis L4.11** Tala KM-14 deformatsioon vastavalt koormusele



**Joonis L4.12** Tala KM-15 deformatsioon vastavalt koormusele

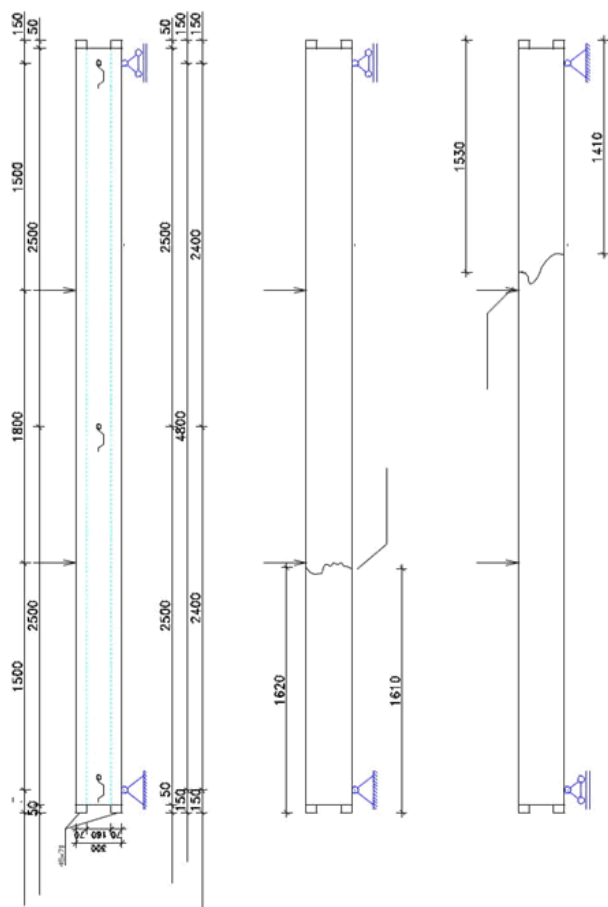



## LISA 5 järg



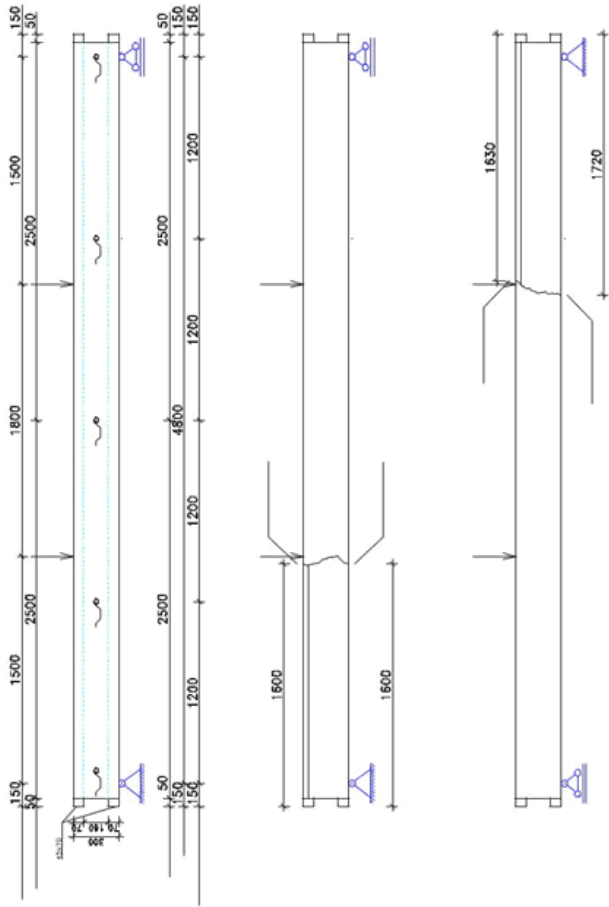
		Metsandus- ja maaehitusinstituut	Karptalade katse- ja purunemisskeemid							
2018	Nimi	Alkikiri	Nimetus:							
Juhendaja	Martti-Jaan Miljan		KM-2							
Koostaja	Mart Müür		Mõõtkava:	1:50	Leht:	2	Lehti:	15	Kuupäev:	19.05.2018

## LISA 5 järg



	Metsandus- ja maaehitusinstituut		Karpalade katse- ja purunemisskeemid			
	2018	Nimi	Alilkiri	Nimetus:		
	Juhendaja	Martti-Jaan Miljan		KM-3		
	Koostaja	Mart Müür		Mõõtkava:	1:50	Leht: 3
				Lehti:	15	Kuupäev: 19.05.2018

LISA 5 järg

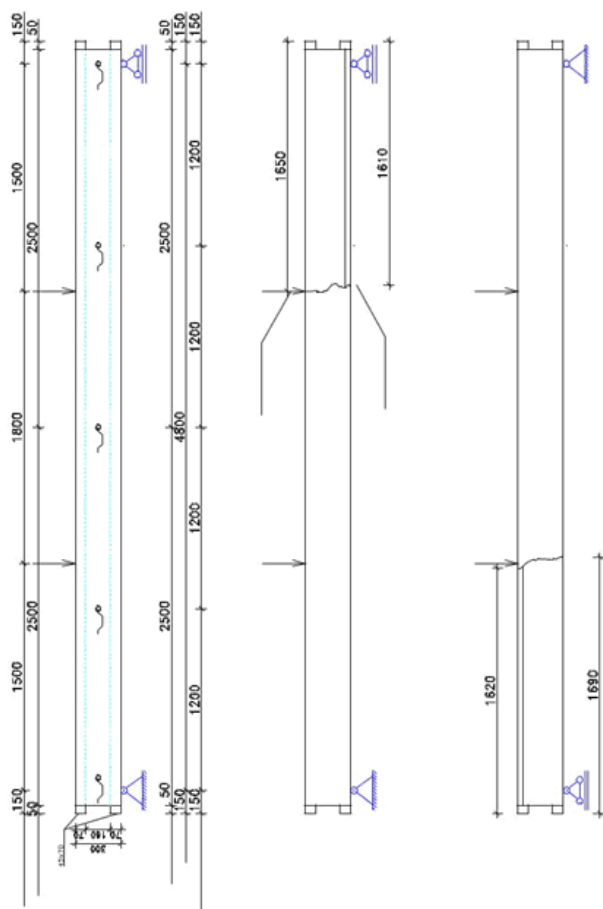



2018	Nimi	Metsandus- ja maaehitusinstituut	
Juhendaja	Martti-Jaan Miijan	Allkiri	Nimetus:
Koostaja	Mart Miiur		

Korptalade katse- ja purunemiskeemid			
KM-4		Lehti: 4	Lehti: 15
Mõõtkava: 1:50		Kuupäev: 19.05.2018	

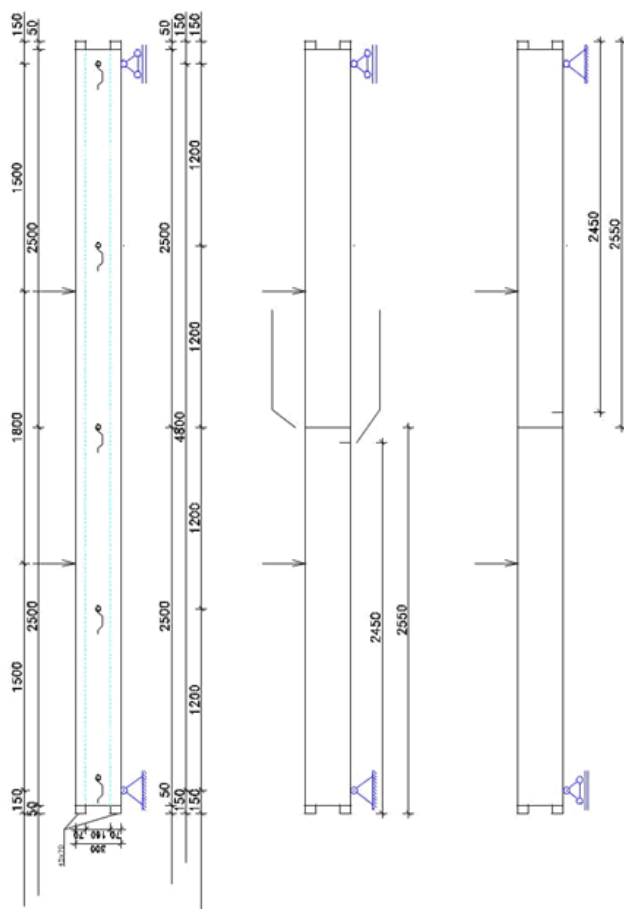



## LISA 5 järg



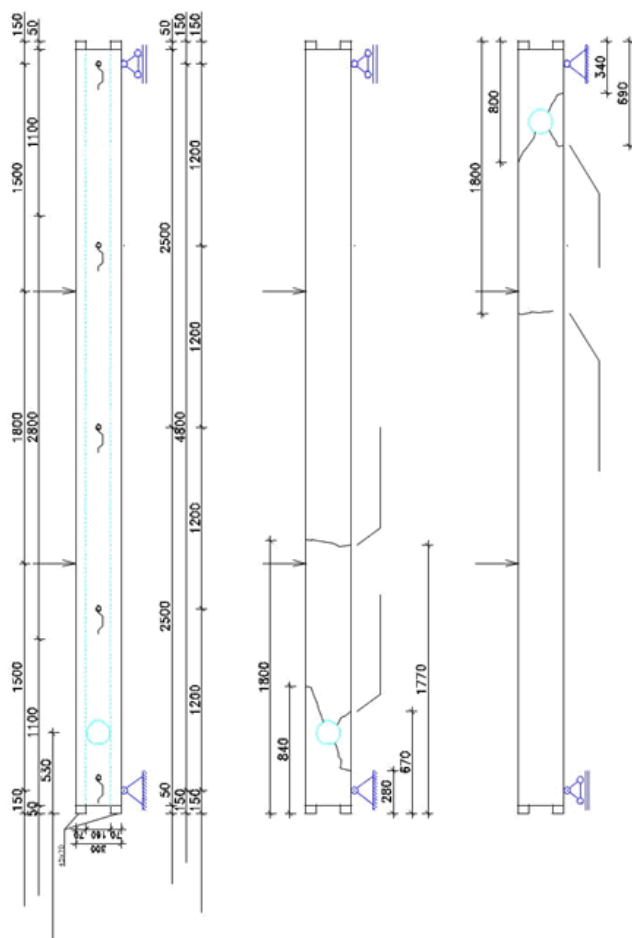
	Metsandus- ja maaehitusinstituut		Kartalade katse- ja purunemisskeemid			
	2018	Nimi	Alkikiri	Nimetus:		
	Juhendaja	Martti-Jaan Miljan		KM-5		
	Koostaja	Mart Määr		Mõõtkava:	1:50	Lehti: 5
				Lehti:	15	Kuupäev: 19.05.2018

## LISA 5 järg



	Metsandus- ja maaehitusinstituut		Kartalade katse- ja purunemisskeemid			
	2018	Nimi	Alkikiri	Nimetus:		
	Juhendaja	Martti-Jaan Miljan		KM-6		
	Koostaja	Mart Määr		Mõõtkava:	1:50	Lehti: 6
						Lehti: 15
						Kuupäev: 19.05.2018

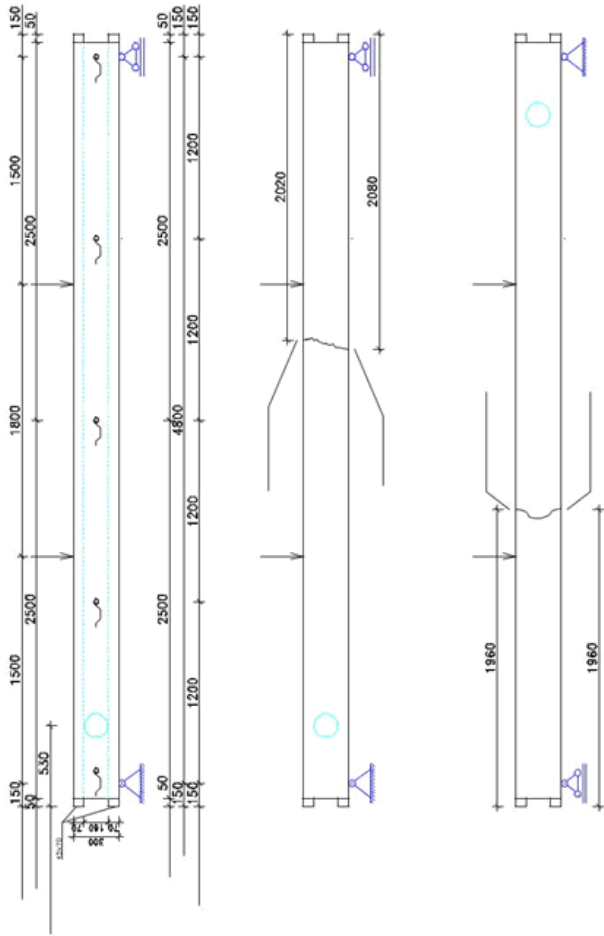
## LISA 5 järg



Metsandus- ja maaehitusinstituut	
2018	Nimi
Juhendaja	Martti-Jaan Miijan
Koostaja	Mart Müür

Karpalade katse- ja purunemiskeemid	
Nimetus:	
KM-7	
Mõõtkava: 1:50	
Lehti: 7	Lehti: 15
Kuupäev: 19.05.2018	

LISA 5 järg

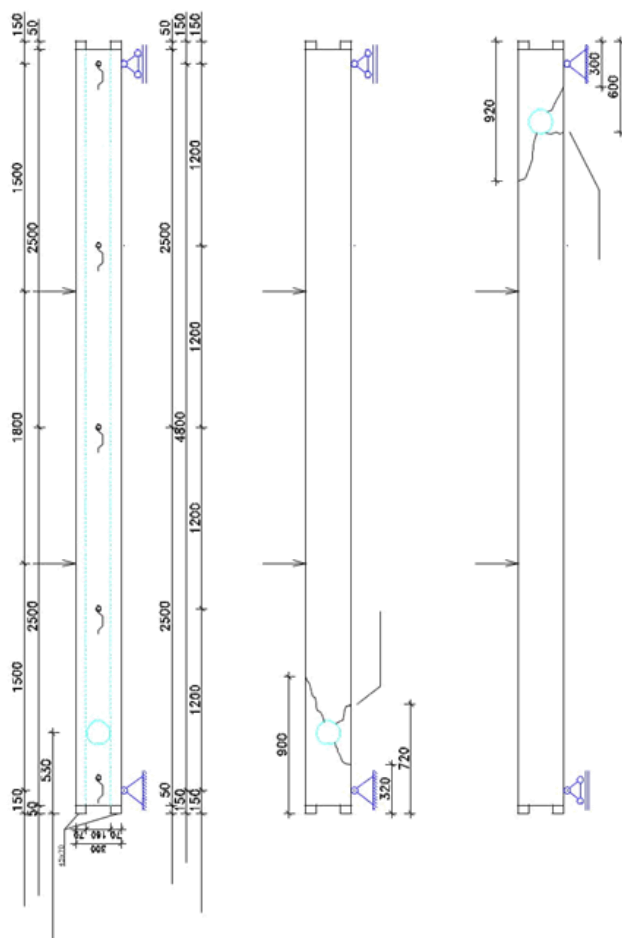


Metsandus- ja  
maaehitusinstituut

2018	Nimi	Allkiri
Juhendaja	Martti-Jaan Miijan	
Koostaja	Mart Miiur	

Karpalade katse- ja purunemiskeemid			
Nimetus:		KM-8	
Mõõtkava:		Leht: 8	Lehti: 15
		1:50	Kuupäev: 19.05.2018

## LISA 5 järg

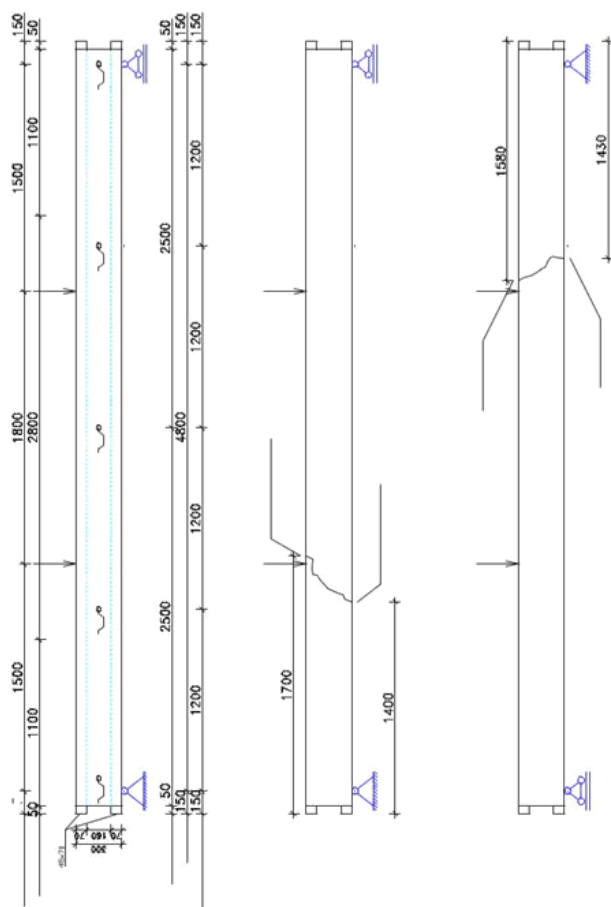



Metsandus- ja  
maaehitusinstituut

2018	Nimi	Allkiri	Nimetus:		
Juhendaja	Martti-Jaan Miijan		KM-9		
Koostaja	Mart Miiur		Mõõtkava: 1:50	Lehti: 9	Lehti: 15
			Kuupäev: 19.05.2018		

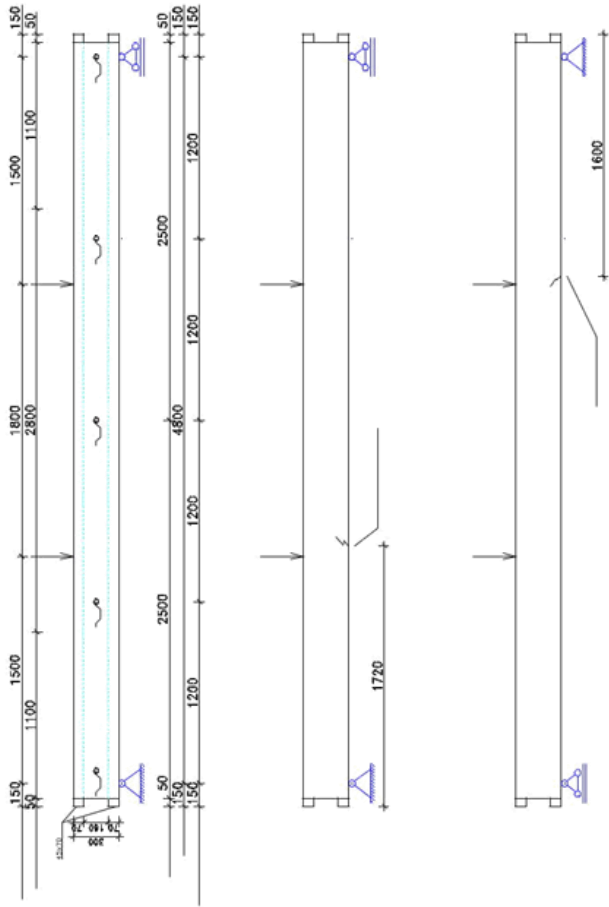
Karptalade katse- ja purunemiskeemid

## LISA 5 järg



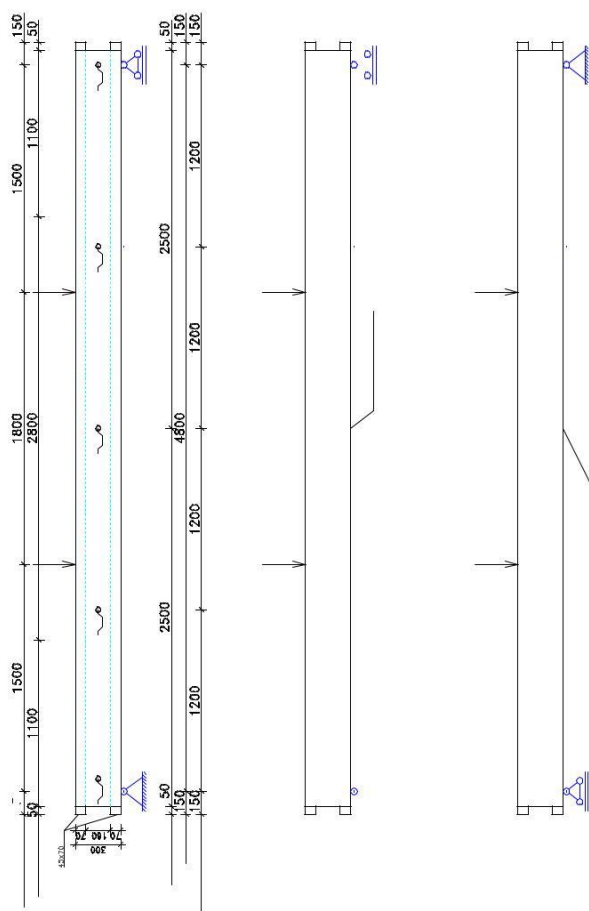
	Metsandus- ja maaehitusinstituut	Kartalade katse- ja purunemisskeemid				
	2018	Nimi	Alilkiri	Nimetus:		
	Juhendaja	Martti-Jaan Miljan		KM-10		
	Koostaja	Mart Müür		Mõõtkava:	1:50	Lehti: 10
				Lehti:	15	Kuupäev: 19.05.2018


LISA 5 järg



Metsandus- ja maaehitusinstituut		Karpalade katse- ja purunemiskeemid			
2018	Nimi	Allkiri	Nimetus:		
Juhendaja	Martti-Jaan Miijan		KM-11		
Koostaja	Mart Miiur		Mõõtkava: 1:50	Leht: 11	Lehti: 15
					Kuupäev: 19.05.2018

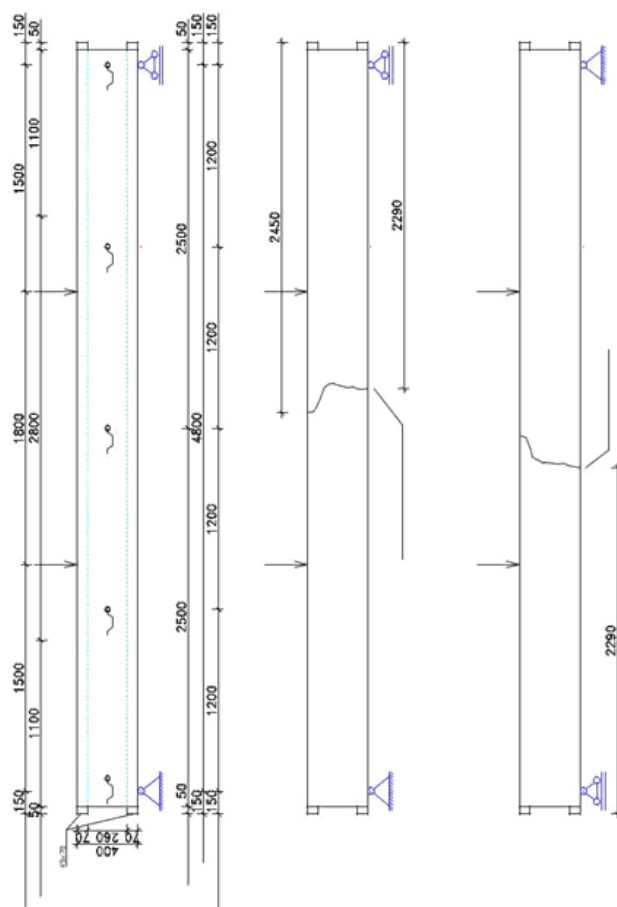
## LISA 5 järg




	Metsandus- ja maaehtusinstituut		Karptalade katse- ja purunemisskeemid			
	2018	Nimi	Alkiri	Nimetus:  KM – 12		
	Juhendaja	Martti–Jaan	Miljan			
	Koostaja	Mart	Müür	Möödikava:	1:50	Lehti: 12 Lehti: 15 Kuupäev: 19.05.2018

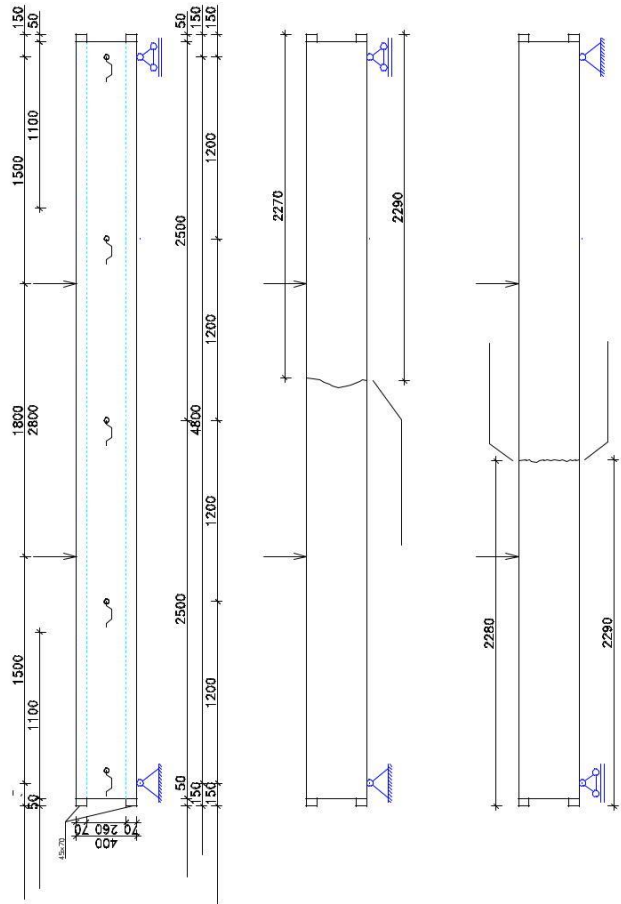


## LISA 5 järg



	Metsandus- ja maaehitusinstituut	Kartalade katse- ja purunemisskeemid				
	2018	Nimi	Allikiri	Nimetus:		
	Juhendaja	Martti-Jaan Miljan		KM – 13		
	Koostaja	Mart Müür		Möötkava:	1:50	Leht: 13
						Lehti: 15
						Kuupäev: 19.05.2018

LISA 5 järg

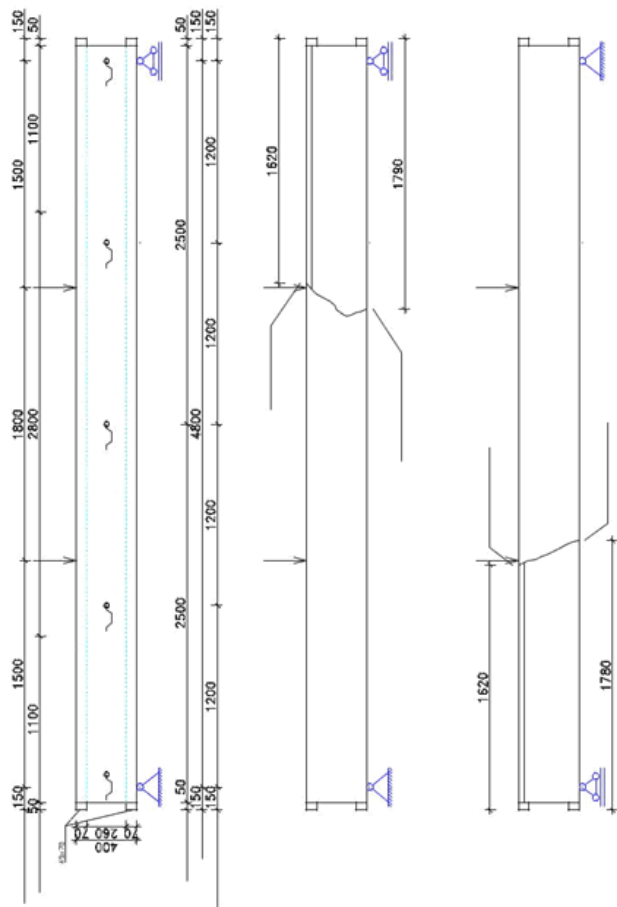


Metsandus- ja  
maaehitusinstituut

Karptalade katse- ja purunemisskeemid

2018	Nimi	Allkiri	Nimetus:		
Juhendaja	Martti-Jaan Milijan		KM-14		
Koostaja	Mart Määr		Mõõtkava: 1:50	Lehti: 14	Lehti: 15
			Kuupäev: 19.05.2018		

LISA 5 järg



Metsandus- ja  
maaehitusinstituut

2018	Nimi	Allkiri	Korptalade katse- ja purunemiskeemid			
Juhendaja	Martti-Jaan Miijan		Nimetus: KM-15			
Koostaja	Mart Miiur		Mõõtkava: 1:50	Leht: 15	Lehti: 15	Kuupäev: 19.05.2018

## LISA 6. Liimitud karptalade purunemispildid



**Joonis L6.1** Tala **KM-1-EK** purunemise asukohapilt esiküljel



**Joonis L6.1** Tala **KM-1-TK** purunemise asukohapilt tagaküljel



**Joonis L6.3** Tala **KM-2-EK** purunemise asukohapilt esiküljel



**Joonis L6.4** Tala **KM-2-TK** purunemise asukohapilt tagaküljel



**Joonis L6.5** Tala **KM-3-EK** purunemise asukohapilt esiküljel



**Joonis L6.6** Tala **KM-3-TK** purunemise asukohapilt tagaküljel



## LISA 6 järg



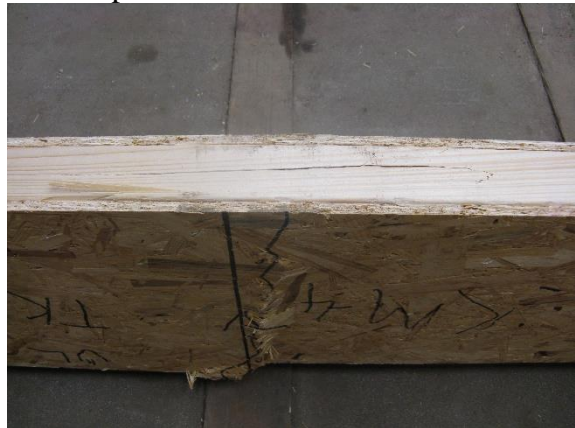
**Joonis L6.7** Tala **KM-4-EK** purunemise asukohapilt esiküljel



**Joonis L6.8** Tala **KM-4-ÜL** purunemise asukohapilt tala ülemisest vööst



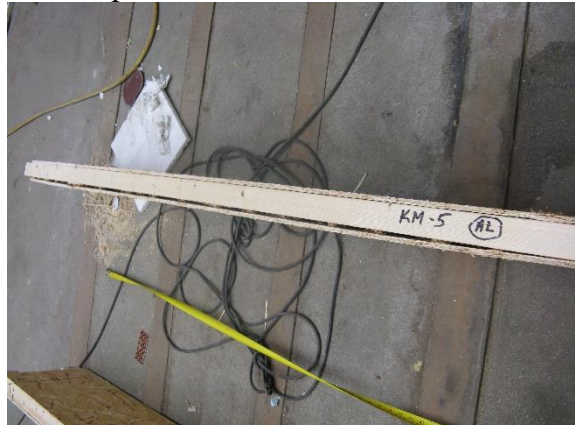
**Joonis L6.9** Tala **KM-4-TK** purunemise asukohapilt tagaküljel



**Joonis L6.10** Tala **KM-4-AL** purunemise asukohapilt tala alumisest vööst



**Joonis L6.11** Tala **KM-5-EK** purunemise asukohapilt, vaade esiküljelt



**Joonis L6.12** Tala **KM-5-AL** purunemise asukohapilt tala alumisest vööst



## LISA 6 järg



**Joonis L6.13** Tala **KM-5-TK** purunemise asukohapilt tagaküljel



**Joonis L6.14** Tala **KM-5-ÜL** purunemise asukohapilt tala ülemisest vööst



**Joonis L6.15** Tala **KM-6-EK** purunemise asukohapilt, vaade esiküljelt



**Joonis L6.16** Tala **KM-6-AL** purunemise asukohapilt tala alumisest vööst



**Joonis L6.17** Tala **KM-6-TK** purunemise asukohapilt tagaküljel



**Joonis L6.18** Tala **KM-7-EK** purunemise asukohapilt esiküljel



## LISA 6 järg



**Joonis L6.19** Tala **KM-7-EK-1** purunemise asukohapilt esiküljel



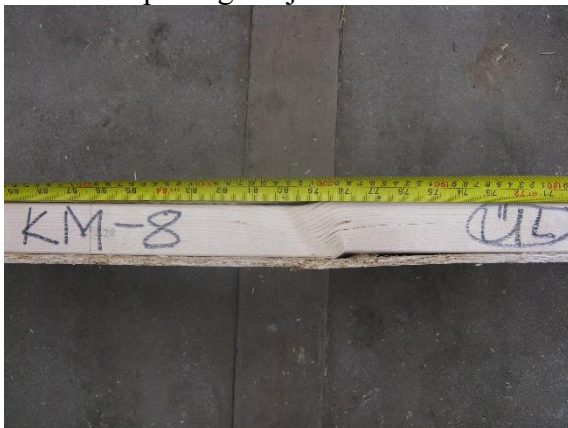
**Joonis L6.20** Tala **KM-7-TK** purunemise asukohapilt tagaküljel



**Joonis L6.21** Tala **KM-7-TK-1** purunemise asukohapilt tagaküljel



**Joonis L6.22** Tala **KM-8-EK** purunemise asukohapilt esiküljel



**Joonis L6.23** Tala **KM-8-ÜL** purunemise asukohapilt tala ülemisest vööst



**Joonis L6.24** Tala **KM-8-TK** purunemise asukohapilt tagaküljel



## LISA 6 järg



**Joonis L6.25** Tala **KM-8-AL** purunemise asukohapilt tala alumisest vööst



**Joonis L6.26** Tala **KM-9-EK** purunemise asukohapilt esiküljel



**Joonis L6.27** Tala **KM-9-TK** purunemise asukohapilt tagaküljel



**Joonis L6.28** Tala **KM-13-EK** purunemise asukohapilt esiküljel



**Joonis L6.29** Tala **KM-13-TK** purunemise asukohapilt tagaküljel



**Joonis L6.30** Tala **KM-14-EK** purunemise asukohapilt esiküljel



## LISA 6 järg



**Joonis L6.31** Tala **KM-14-TK** purunemise asukohapilt tagaküljel



**Joonis L6.32** Tala **KM-14-ÜL** purunemise asukohapilt tala ülemisest vööst



**Joonis L6.33** Tala **KM-15-EK** purunemise asukohapilt esiküljel



**Joonis L6.34** Tala **KM-15-TK** purunemise asukohapilt tagaküljel



**Joonis L6.35** Tala **KM-15-ÜL** purunemise asukohapilt tala ülemisest vööst



**Joonis L6.36** Tala **KM-15-ÜL-1** purunemise asukohapilt tala ülemisest vööst



## LISA 6 järg



**Joonis L6.37** Paneel KMP-1 projektsioonvaade



**Joonis L6.38** Paneeli KMP-1 tala KM-10-EK purunemise asukohapilt esiküljel



**Joonis L6.39** Paneeli KMP-1 tala KM-10-TK purunemise asukohapilt tagaküljel



**Joonis L6.40** Paneeli KMP-1 tala KM-10-AL purunemise asukohapilt tala alumisest vööst



**Joonis L6.41** Paneeli KMP-1 tala KM-11-EK purunemise asukohapilt esiküljel



**Joonis L6.42** Paneeli KMP-1 tala KM-11-TK purunemise asukohapilt tagaküljel

## LISA 6 järg

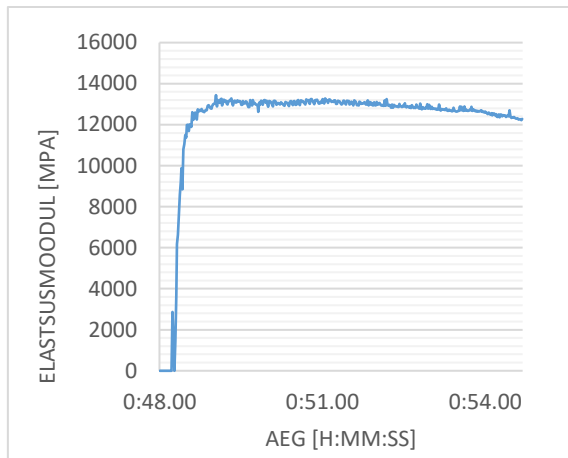


**Joonis L6.43** Paneeli KMP-1 tala **KM-12-EK** purunemise asukohapilt esiküljel

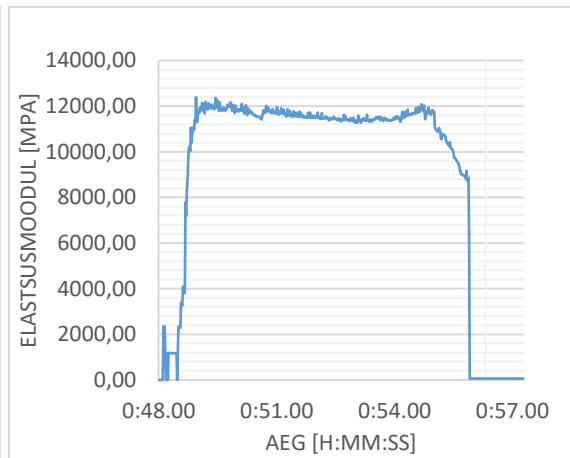


**Joonis L6.44** Paneeli KMP-1 tala **KM-12-TK** purunemise asukohapilt tagaküljel

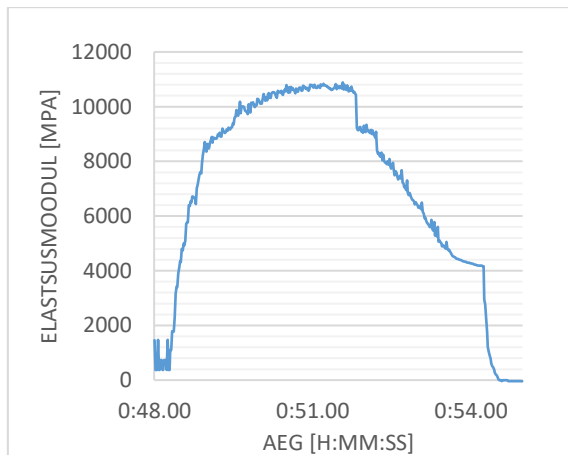
## LISA 7 Liimliitega karptalade elastsusmoodul ajas tala koormamisel kuni tala kandevõime kaotuseni



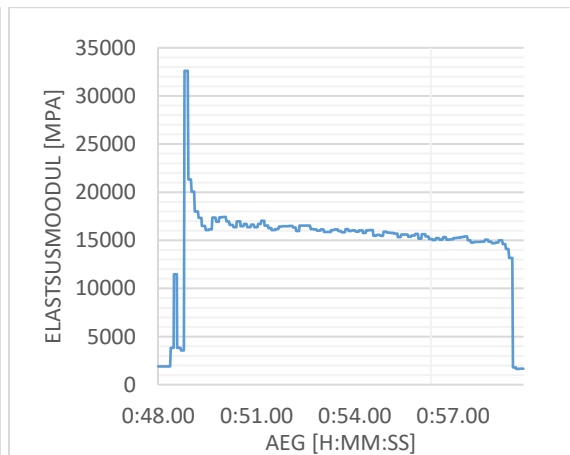
**Joonis L7.1** Tala KM-1 elastsusmoodul koormamisel kuni kandevõime kaotuseni



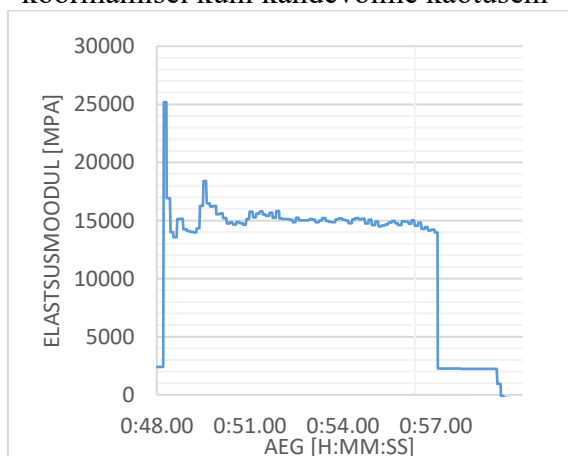
**Joonis L7.2** Tala KM-2 elastsusmoodul koormamisel kuni kandevõime kaotuseni



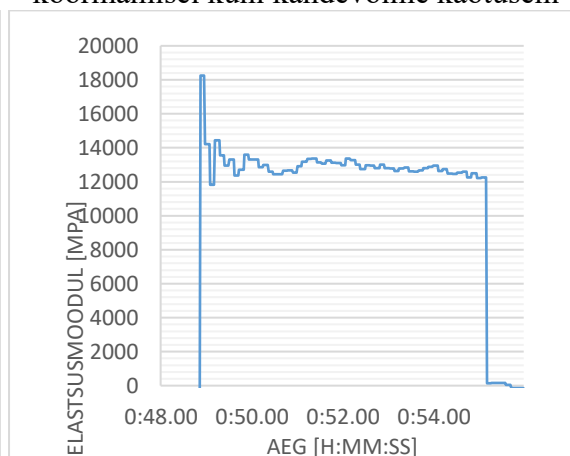
**Joonis L7.3** Tala KM-3 elastsusmoodul koormamisel kuni kandevõime kaotuseni



**Joonis L7.4** Tala KM-4 elastsusmoodul koormamisel kuni kandevõime kaotuseni

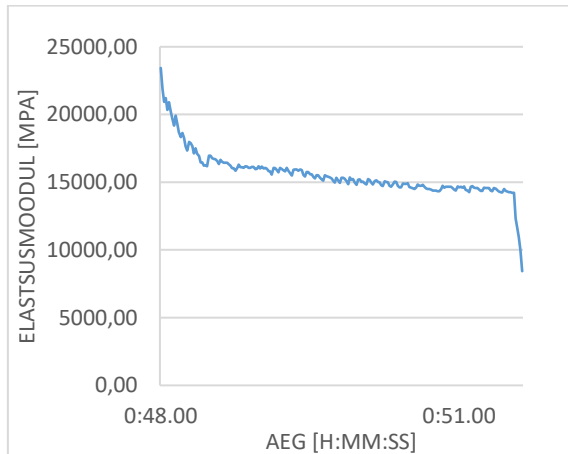


**Joonis L7.5** Tala KM-5 elastsusmoodul koormamisel kuni kandevõime kaotuseni

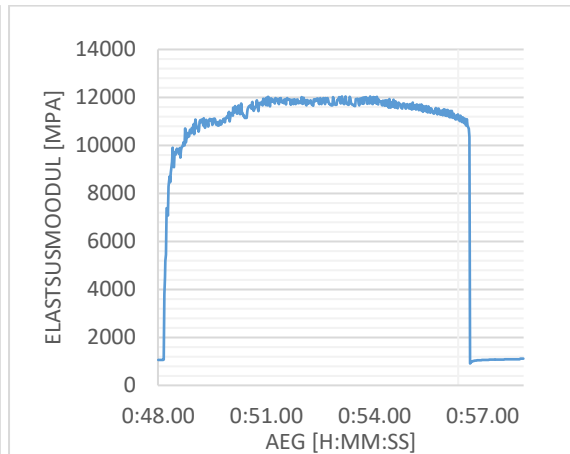


**Joonis L7.6** Tala KM-6 elastsusmoodul koormamisel kuni kandevõime kaotuseni

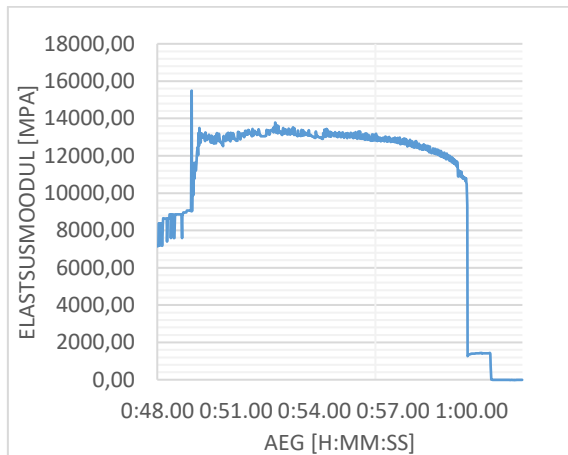
## LISA 7 järg



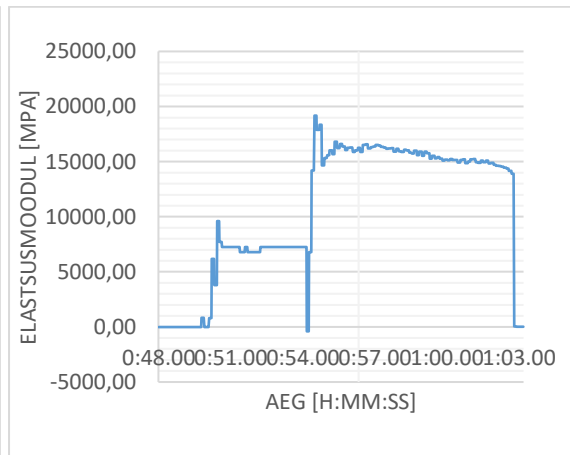
**Joonis L7.7** Tala KM-7 elastsusmoodul koormamisel kuni kandevoime kaotuseni



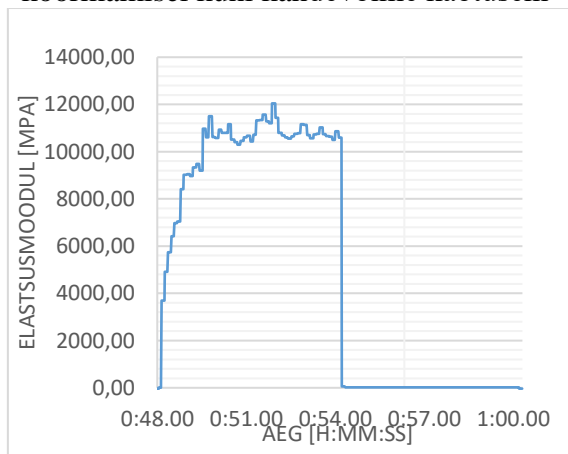
**Joonis L7.8** Tala KM-8 elastsusmoodul koormamisel kuni kandevoime kaotuseni



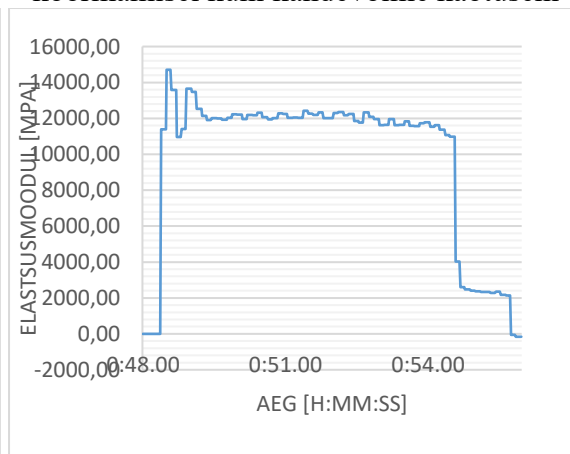
**Joonis L7.9** Tala KM-9 elastsusmoodul koormamisel kuni kandevoime kaotuseni



**Joonis L7.10** Tala KM-13 elastsusmoodul koormamisel kuni kandevoime kaotuseni



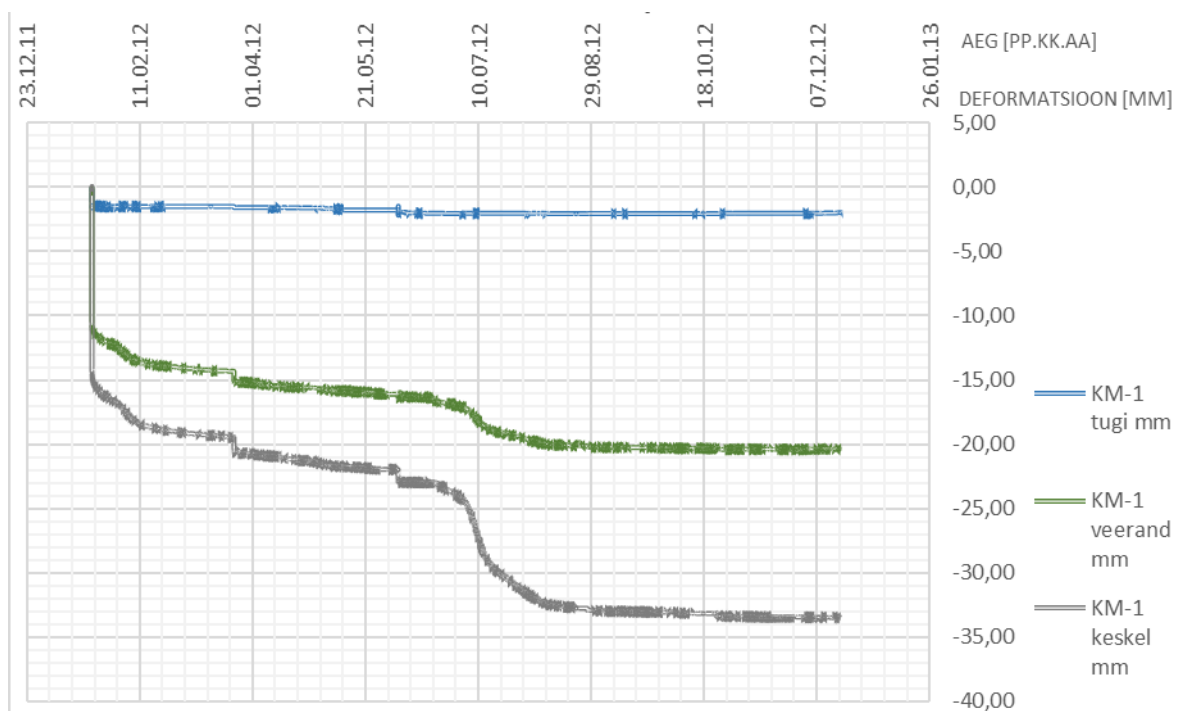
**Joonis L7.11** Tala KM-14 elastsusmoodul koormamisel kuni kandevoime kaotuseni



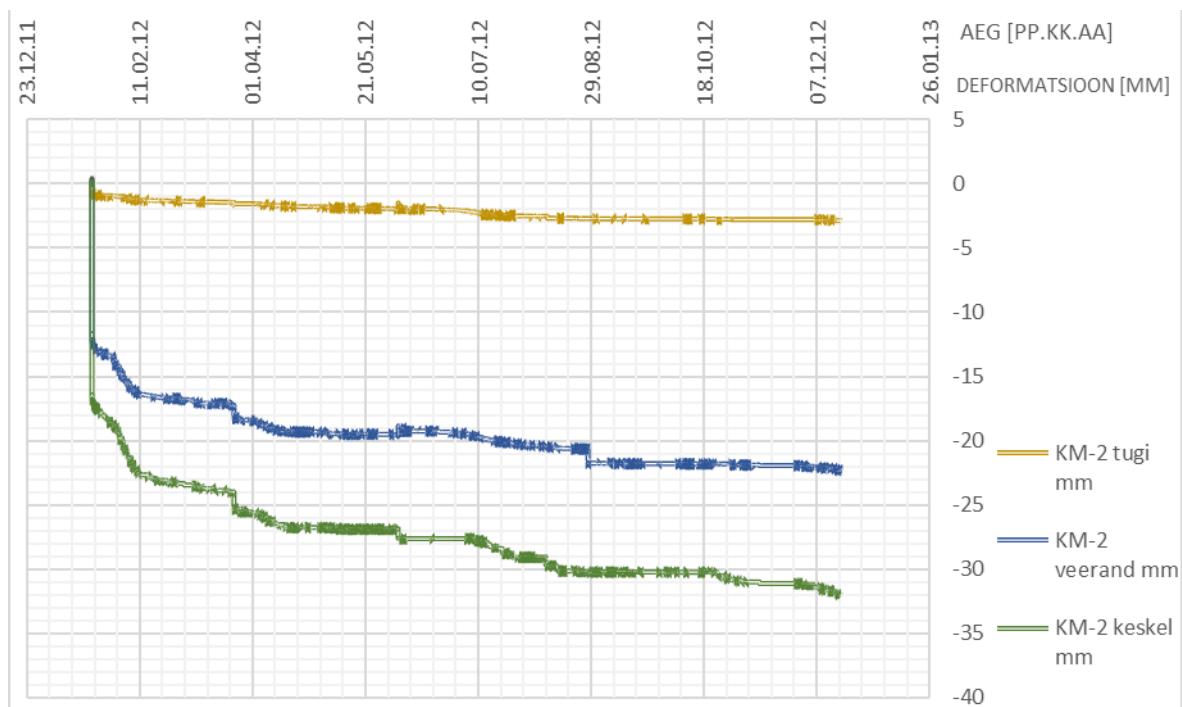
**Joonis L7.12** Tala KM-15 elastsusmoodul koormamisel kuni kandevoime kaotuseni



## LISA 8. Pikaajalise katse deformatsioon ajas

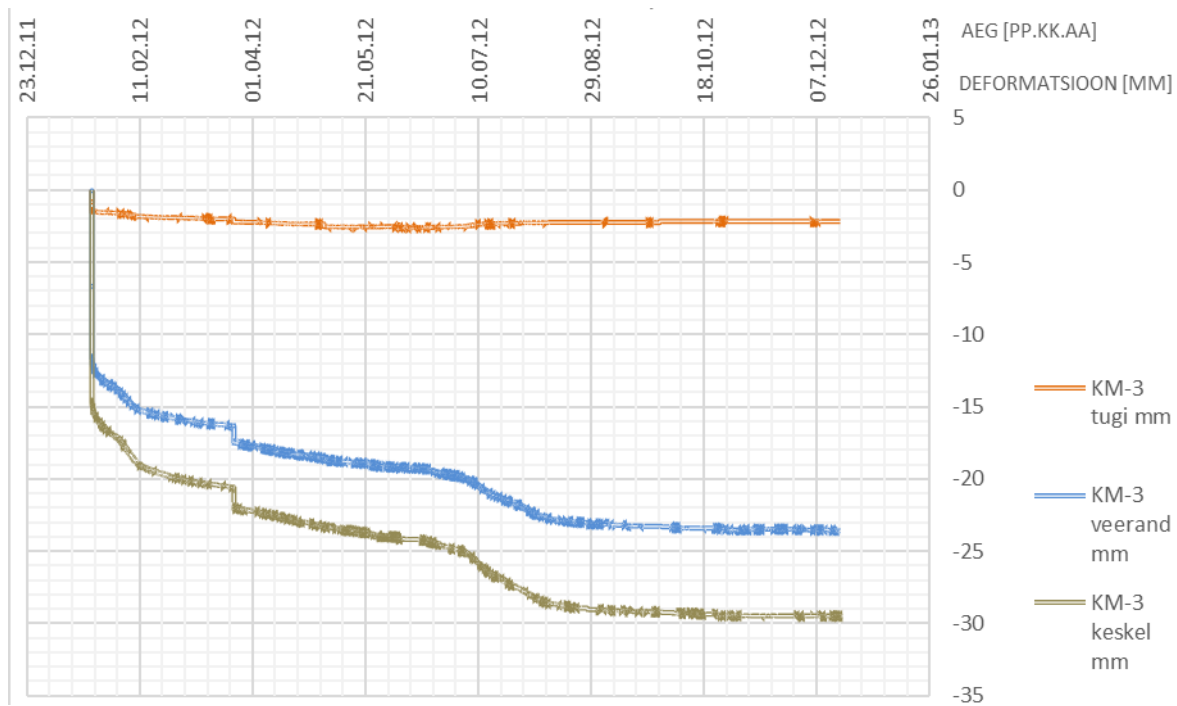


Joonis L8.1 Karptala KM-1 pikaajalise katse deformatsioonigraafik



Joonis L8.1 Karptala KM-2 pikaajalise katse deformatsioonigraafik

## LISA 8 järg



**Joonis L8.1** Karptala KM-3 pikaajalise katse deformatsioonigraafik

**Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks  
ning juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Mina, Mart Müür, isikukoodiga 38602076012

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö  
LIIMITUD ÕHUKESSEINALISTE KARPTALADE UURIMINE ,

mille juhendaja on noormeteadur Martti-Jaan Miljan ,

- 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
- 1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
- 1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega  
isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor

\_\_\_\_\_

allkiri

Tartu, 28.05.2018

---

**Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Luban lõputöö kaitsmisele.

\_\_\_\_\_

(juhendaja nimi ja allkiri)

\_\_\_\_\_

(kuupäev)